以上黏度与浓度的关系式仅适用于有机溶液的溶液体系。对现代涂料，如水性漆，树脂利用少量的离子化基团并辅以助溶剂的溶胀作用，使之以胶束分散体形式分散于水相中，属非牛顿流体，在稀释过程中的黏度变化极为复杂，存在一稀释峰。至少，降低基料分子量、增加离子基团数量和助溶剂用量，都会减少胶束形成。特别是采用两种不同挥发性的助溶剂，对改善涂膜外观很有益处。挥发快的助溶剂可减少流挂；挥发慢的助溶剂使之流平。但助溶剂的挥发性不能比水慢，否则湿膜产生“延迟流挂”现象。

（三）溶剂黏度对溶液黏度的影响

通常，人们习惯于用溶剂对树脂的溶解能力或分散作用来判断其溶液黏度的大小。实际上，溶剂本身的黏度在 mPa·s 的差别下，可能使溶液黏度产生成千上百毫帕·秒的变动。

例如：用正庚烷或甲苯配成 50% 的石灰松香溶液。25℃时，$\eta_{正庚烷}$ = 0.39mPa·s，$\eta_{甲苯}$ = 0.56mPa·s，$\Delta\eta_0$ = 0.17mPa·s。从分散作用考虑，甲苯溶液的黏度应更低，实测结果是 $\eta_{甲苯溶液}$ = 31mPa·s，$\eta_{庚烷溶液}$ = 22.5mPa·s。在此例中，溶剂黏度的作用比溶剂分散作用的影响要大，其影响作用的大小与比黏度（$\eta/\eta 0$）成正比：

$$\lg(\eta/\eta_0) = W[\eta]\rho/0.023$$

式中　ρ——溶剂密度；

$[\eta]$ ——特性黏度，即 $[(\ln\eta_r)/C]_{c\to 0}$ 的值，表示溶剂在相同密度下的黏度值。

若树脂在两溶剂中的特性黏度基本相等，对于同质量浓度的溶液，η/η_0 = 常数。

由于涂料往往采用混合溶剂。对于溶剂之间没有相互作用的理想混合，如酮、酯、烃类溶剂之间的混合，混合溶剂的黏度由下式给出：

$$\lg\eta = \sum W_i \lg\eta_i$$

对于醇含量小于 40% 的醇/烃混合溶剂，或有氧溶剂含量小于 30% 的水混合溶剂，应分别按表 1－6－4 和表 1－6－5 中有效黏度进行计算（水的黏

度为 0.92mPa·s）。

表 1－6－4　各种醇类溶剂在 25℃的真实黏度和有效黏度

醇类溶剂	黏度 mPa·s		黏度比（η_e/η_a）
	真实黏度（η_a）	有效黏度（η_e）	
乙醇	1.30	1.05	0.81
甲氧基乙醇	1.60	1.20	0.75
乙氧基乙醇	1.90	1.20	0.63
丙醇	2.00	1.40	0.70
异丙醇	2.40	1.10	0.46
丁醇	2.60	1.60	0.62
仲丁醇	2.90	1.40	0.48
丁氧基乙醇	2.90	2.00	0.69
二丙酮醇	2.90	2.00	0.69
异丁醇	3.40	1.80	0.53
甲基异丁基甲醇	3.80	1.80	0.47
丁氧基乙氧基乙醇	5.30	2.15	0.41
2－乙基己醇	7.78	3.30	0.42
平均			0.59

注：与烃类溶剂混合，醇类溶剂含量在 30%～40%以下。

1－6－5　氧有机溶剂在 25℃时的真实黏度和有效黏度

醇类溶剂	黏度 mPa·s		黏度比（η_e/η_a）
	真实黏度（η_a）	有效黏度（η_e）	
丙酮	0.3l	6.06	19.5
厂酮	0.41	9.8	23.9
甲氧基乙醇	1.60	14.0	13.0
乙氧基乙醇	1.90	24.4	8.8
异丙醇	2.10	59.3	28.2
二丙酮醇	2.90	22.2	7.7

醇类溶剂	黏度 mPa·s		黏度比（η_e/η_a）
	真实黏度（η_a）	有效黏度（η_e）	
丁氧基乙醇	2.90	32.1	11.1
甲氧基乙氧基乙醇	3.80	17.3	4.6
乙氧基乙氧基乙醇	4.00	26.1	6.5
叔厂醇	4.50	116.4	25.9
丁氧基乙氧基乙醇	5.30	35.0	6.6
乙二醇	17.4	10.0	0.57
二甘醇	28.9	15.6	0.54
已二醇	29.8	65.0	2.2

注：与水混合，含氧有机溶剂含量在 20% ~ 30% 以下。

对于水醇混合溶剂，也可以在任何浓度范围内按下式计算：

$$\lg\eta = (1 - W)\lg\eta_{H_2O} + \sum_{wj} W\lg\eta_{aj} + \sum_{wj}(1 - W)\lg\eta_{ej}$$

式中　w_j——第 j 个醇溶剂的质量分数（$W = \sum_{wj}$）；

η_{aj}——第 j 个醇溶剂的实际黏度；

n_{ej}——第 j 个醇溶剂的有效黏度。

三、涂料流变学

（一）涂料流动方程

在涂料生产、施工和干燥成膜过程中，涂料必须经受极端变化的剪切速率的作用。例如，在高速分散时，叶片附近的剪切速率（D）高达 $10^3 \sim 10^4 s^{-1}$，而在器壁或液面处，近乎静止（$D = 1 \sim 10 s^{-1}$）；放入贮罐后，D 又立即下降到 $10^{-3} \sim 0.5 s^{-1}$，颜料易沉降；施工时，刷涂、喷涂或辊涂的 D 又上升到 $10^3 s^{-1}$ 以上，某些辊涂施工甚至高达 $10^5 s^{-1}$；施工以后，湿膜的 D 又下降到 $1 s^{-1}$ 以下，对涂料的流平、流挂、渗透产生影响。在 D 大幅度变化时，黏度也从 0.1Pa·s 至 10^5 Pa·s 发生极端改变。

图 1－6－4 为不同配方涂料的 η－D 曲线。曲线 1 由于配方不正确，施工时黏度太低，施工后黏度过高造成流平性差。曲线 2 涂料配方正确，低剪切速率下，涂料屈服值 $\tau_0 = 0.4 \sim 1.0$Pa，贮存时的抗沉降和施工后的抗流挂和流平性均良好；高剪切速率下，黏度在 0.1～0.3Pa·s 之间，有良好的施工性能。曲线 3 在施工时黏度太高，涂刷造成拖带；施工后黏度太低，造成流挂。

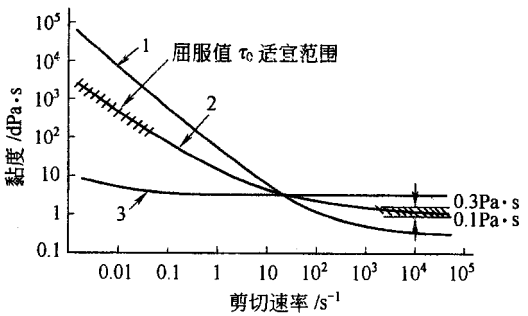


图 1－6－4　配方各异的涂料流变曲线

因此，涂料配方必须通过对其流变学的表述来进行优化。表述方式除了曲线之外，也可采用数学公式。由于 D 或 η 在极端范围内变化，用一个方程能表述全部范围内的黏度分布，唯一有效的是 Casson 方程：

$$\eta_D^n = \eta_\infty^n + (\tau_0/D)^n$$

式中　η_D——某一剪切速率下的黏度，dPa·s；

η_∞——剪切速率无穷大时的黏度，dPa·s；

τ_0——屈服值，0.1Pa；

n——指数（一般为 0.5）。

涂料在 $D > 10^4 s^{-1}$ 时，颜料的絮凝、胶团聚集或任何其他因素引起的结构黏度都被破坏消失，此 η 可近似作为 η_∞（亦可用外推法获得）。τ_0 值很难测定，一般以极低剪切速率下的黏度近似计算。即

$$\eta_D^n = \eta_\infty^n + (\tau/D)^n \underset{D\to 0}{\approx} (\tau/D)^n \quad (D\to 0)$$

则

$$\tau_0 \approx {}_\eta D\ (\text{D 极小}) = \tau\ (\text{D 极小})$$

也可以利用高、中、低剪切速率下的三组黏度数据来确定 n、η_∞ 和 τ_0 三个常数。此时，以极高 D 下的 η_h 作为 η_∞，而 D_m 对应 η_m，D_1 对应 η_1，则：

$$(\eta_m D_m/D_1)^n + n_\infty^n - (\eta_\infty D_m/D_1)^n - D_1^n = 0$$

利用一系列在 0.5 附近的数值作为 n 值代入方程，使方程等于零的 n 就是所求的解。再按照：

$$\eta_1^n = \eta_\infty^n + (\tau_0/D_1)^n$$

求得 τ_0，这样就确定了该涂料的 Casson 方程。

涂料在高剪切速率下的黏度和涂料屈服值是涂料流变性的两个重要性质。涂料在高剪切速率范围内的流动特性由涂料基本组成所决定；而涂料在低剪切速率范围内的流动特性可添加少量的流变助剂来调整。另外，颜料的絮凝或基料的胶体性质也影响低剪切范围内涂料的流动性质。

对溶剂性涂料，$D = 10^4 s^{-1}$ 时的适宜刷涂黏度为 0.10～0.30Pa·s；乳胶漆刷涂，在 $D = 1400 s^{-1}$ 时，施工黏度宜在 0.25～0.5Pa·s；喷涂施工时，$D = 2500 s^{-1}$，施工黏度宜在 0.025～0.25Pa·s。流平性好的涂料也用较高的施工黏度来获得厚涂膜，反之造成施工困难。

未受剪切作用的溶剂性涂料屈服值至少应在 0.40Pa 以上，防止颜料沉降。但屈服值在受剪切作用（如施工）后都有下降，希望这种下降是暂时的，它应能立即回复到 0.4Pa 以上，以防流挂。对于触变体，下降明显；对假塑性流体只有稍微下降。这种瞬间的屈服值低于 0.4Pa，有利于涂膜流平。

乳胶漆的屈服值应大于 1.0Pa，施工后屈服值应瞬间下降到 0.25Pa，又能立即回复到 0.5Pa 以上。Patton 提出计算乳胶漆屈服值的经验如下：

$$\tau_0 = 0.0056\eta^{1.35}$$

式中　η——$D = 0.085 s^{-1}$ 时的黏度值。

例 6：某乳胶漆涂刷后，漆膜丰满度、流平性和流挂性良好，在 $D = 0.085 s^{-1}$ 测得未剪切和剪切后的黏度分别是 24.5Pa·s 和 9.7Pa·s。试计算屈服值。

解　未剪切时：$\tau_0 = 0.0056 \times 24.5^{1.35} = 0.94Pa$

剪切后：$\tau_0 = 0.0056 \times 9.7^{1.35} = 0.27\text{Pa}$

此计算结果说明了一配方合理的乳胶漆应有的屈服值水平。

（二）涂料流平方程

涂料流平方程以按正弦波剖面理论（如图 1－6－5 所示）推导的公式能较精确地反映实验结果。即

$$\ln \frac{a_0}{a_t} = \frac{16\pi^4}{3} \times \frac{\sigma x^3}{\lambda^4} \int \frac{dt}{\eta}$$

或

$$\lg = \frac{a_0}{a_t} = \frac{226\sigma x^3}{\lambda^4} \int \frac{dt}{\eta}$$

式中　a_0——初始振幅，cm；

a_t——t 时的振幅，cm；

x——平均膜厚，cm；

λ——波长；

σ——表面张力，mN/m；

η——黏度，P；

t——时间，s。

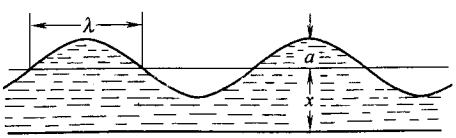


图 1－6－5　涂膜按正弦波模式的条痕剖面示意

涂料表面张力是涂膜流平的驱动力，一般在 25～55mN/m。因范围窄，可取 35mN/m 这一中间值。由于表面张力基本上可看作定值，这样膜厚（x）和条痕波长（λ）成为流平时间的极大影响因素。在其他条件相同时，如果 x 增加一倍，流平时间缩短到 1/8；λ 增加一倍，流平时间为原来的 16 倍。

例 7：一典型的流平状况如下：$a_0 = 0.0080\text{cm}$，$a_t = 0.000050\text{cm}$（流平终点），$x = 0.010\text{cm}$，$\lambda = 0.10\text{cm}$（10 条痕/cm），$\sigma = 35\text{mN/m}$，若黏度恒定

为 1.0Pa·s、10.0Pa·s 和 100.0Pa·s 时，流平时间多长？

解　按流平方程：

$$t = \frac{\lambda^4 \eta}{226\sigma x^3} \lg \frac{a_0}{a_t} = 0.28s \quad (10.0Pa \cdot s)$$

10.0Pa·s 为 2.8s，100.0Pa·s 为 28s。

实际上流平过程中黏度是不断变大的，它由任一瞬间的剪切应力（或 D）所决定。结合 Casson 方程，可得到任一瞬间由，所施加的最大剪切应力为：

$$\tau = \frac{248\sigma x a}{\lambda^3} \times f\left(\frac{x}{\lambda}\right)$$

由于流平过程中，σ、x、λ、都基本保持不变，则 τ 正比于 a 变化。流平终点时，$a = 5 \times 10^{-5}$cm，由图 1－6－6 查得 f（x/λ）值，然后求 τ 值。若涂料 $\tau_0 \geqslant \tau$，则无法流平。将 τ_0 代入上式，可求得涂料流平过程能达的最小振幅 a_{min}：

$$a_{min} = \frac{\tau_0 \lambda^3}{248\sigma x f\ (x/\lambda)}$$

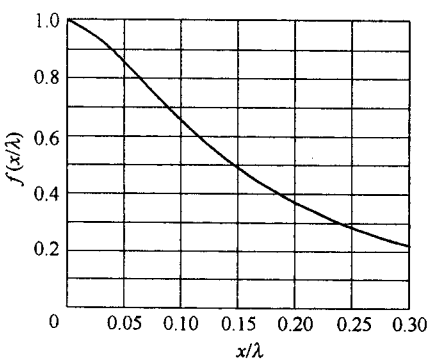


图 1－6－6　f（x/λ）与 x/λ 的关系图

上述流平方程不适合于触变体。因触变体在剪切后的刁恢复受到时间的制约。另外，流平过程中，溶剂挥发也造成黏度的持续上升。在多孔性表面涂漆，溶剂通过毛细管作用吸收于孔隙中，会导致流平的突然终止。对乳胶漆，在水分初期挥发阶段，乳胶粒子在刚接触时转变成半刚性状态，有碍涂

膜流平。

涂膜流平测定可在由低到高的膜厚方向上，用单位长度齿数不同但齿宽和齿间距相等的梳子划痕，依沟痕确定流平时间。

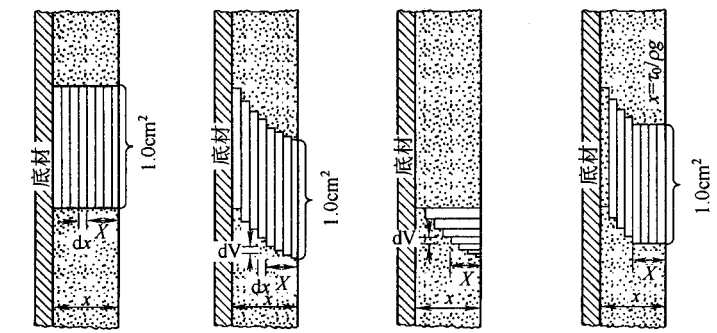
（三）涂料流挂方程

湿涂膜受重力驱动造成的流痕叫作流挂。流挂模型如图 1－6－7 所示。涂膜中距离表面工位置单位面积薄层引起流挂的拉力（即剪切应力 τ_x）：

$$\tau_x = \rho_{xg}$$

式中　ρ——涂料密度；

g——重力加速率



(a) 涂料初始以均匀厚度施工于垂直底材上的几何形状示意图　(b) 此涂层流挂之后的几何形状示意图　(c) 流挂期间流挂下的涂料通过任选一水平面的体积增量示意图　(d) 当涂料屈服值很高时出现滑挂的几何形态示意图

图 1－6－7　流挂模型

横穿这一薄层的剪切速率为 $-dv/dx$（负号表示流挂速率 v 与 x 的变化方向相反），有流挂条件：

$$\eta = \frac{\tau}{D} = -\frac{\rho x g}{dv/dx}$$

变换方程得：

$$dv = -\frac{\rho g}{\eta} x dx$$

由于 $x = X$ 时，$v = 0$。积分得：

$$v = -\frac{\rho g}{\eta}(X^2 - x^2)$$

则表层（$x = 0$）的流挂速率：

$$v_0 = \rho g X^2 / 2\eta$$

上述均为理想状态下的流挂速率。此理想状态指牛顿流动、无溶剂挥发和温度变化。在底材界面上的薄层有最大剪切应力：

$$\tau x_{(max)} = \rho X g$$

按图 1－6－9（c）的流挂体积模型

$$\frac{dV_s}{dt} = -\frac{\rho g}{\eta}\int_{x_1=0}^{x_2=x} x dV = \int_{x_1=0}^{x_2=x} x^2 dx$$

积分得：

$$V_s = \frac{\rho g}{3\eta} X^3 t$$

例 8：某磁漆的施工黏度为 30s（0.1Pa·s），假设施工后黏度没有回升能力，垂直面湿膜厚度分别为 50μm 和 100μm 时，求 10min 时磁漆表面的流挂距离（$\rho = 1.1 g/cm^3$）。

解　一般涂料的闪干时间最长为 10min，若忽略溶剂挥发：

$h = V_{0t} = \rho g x^2 t/(2\eta)$

$x = 50\mu m$ 时，$h = 8.1cm$，$V = 0.027cm^3$

$x = 100\mu m$ 时，$h = 32.4cm$，$V = 0.216cm^3$

显然，牛顿型涂料的抗流挂性很差，并随着膜厚增加，流挂越趋严重。但实际上涂料都是假塑性的，且在闪干过程中溶剂挥发使温度降低和浓度增加，导致黏度上升，同时也使涂膜减薄。所有这些因素都使流挂得到抑制。但是，黏度作为流挂阻力，总是配方设计应考虑的主要因素。通常是添加少量流变助剂于牛顿型涂料中，使低剪切速率下的黏度达到几百至几千泊（P）或赋予涂料一抗流挂的屈服值。

由于黏度对流平和流挂的影响作用是相反的，改变黏度只能使流平和流挂性调至适宜程度。流平与流挂这一对矛盾的彻底解决，只有利用触变性赋予体系一适当的屈服值，才能获得极佳的流平性和抗流挂性。

有较大屈服值的涂料，有时观察到坍落现象［图 1－6－7（c）］。坍落

层厚度按 $\tau = \rho g x = \tau_0$ 求得。即

$$x = \tau_0 / (\rho g)$$

若 τ_0 足够大，则 $x \geqslant X$，对 X 厚的涂膜，流挂被阻止。

高固体分涂料，因固体分高达 70%（质量分数）以上，喷涂过程溶剂挥发少［约 5%（质量分数)］。普通溶剂性涂料，施工固体分约 30%（质量分数)，喷涂过程溶剂挥发损失高达 50%（质量分数）左右。显然，高固体分涂料不存在溶剂挥发产生的黏度上升和涂膜减薄诸抗流挂因素，流挂控制成为高固体分涂料配方的关键。最好的办法是赋予一抗流挂屈服值。

若涂膜厚度不均匀，在局部厚度大于 X 的区域将产生流痕；若涂膜整体厚度大于 X，将产生流淌，涂膜上端薄、下端厚，厚度分布按下式计算：

$$X_h = \sqrt{h\left(\frac{\rho g t}{\eta}\cos\beta + \frac{h}{x_0^2}\right)}$$

式中　h——从顶点量起的距离；

x_0——初始厚度；

t——流淌时间；

β——样板倾角。

第三节　涂料配方试验方法

前面我们已经掌握了涂料组成的基础知识，特别是对影响涂料性能的方方面面有了清晰的了解，针对某一用途的涂料，已经可以按各个因素的影响大小，初步拟定涂料的各个组分及其大致配比。那么，本章节就是提供一些便捷而行之有效的系统试验方法，优化配方，赋予涂料最佳性能；或者在预定性能下，获得最经济的配方。

富有经验的专家，针对某些重要因素，采用某种试验方法，只需几次试验就可达到期望值。但对本专业的新手来说，可把包含了所有因素的系统，用统计分析的方法，使随机误差减少到可接受的低限，并精确地评价各因素的影响作用。由于是复杂的多因素系统，各因子的所有水平组合都必须试

验。如果某个实验重复以求平衡，那么所有因子试验都应重复，试验次数很大，试验工作量大幅度增加，但对缺乏经验的新手来说，试验是在系统方法的指导下，而不是盲目的，终究会得到可靠的结果。

一、正交试验法

正交试验就是对涂料配方的几个重要因素，适当地安排几个水平，按照相应的正交试验表，将全部因素的所有水平组合分别进行试验。个别试验的结果按照各个因子的各个水平进行累加，并求出极值及极差大小，就每个因子极值所对应的水平，可确定最佳配方比例；根据极差大小，可确定各因子的影响作用大小；根据累加值按水平的变化趋势，可以判定有显著影响作用因子的最佳水平是否在拟定水平范围内。若不是，则再针对某几个重要因素（包括第一次正交试验未曾考虑到的因子）安排相宜的水平，进行第二次正交试验。

这里，涂料技术水平不是由某一项性能所能决定的，往往以综合性能指标来评定涂层质量。该综合性能指标包括涂层的防护性、装饰性、物理力学性能及特种性能等特征性技术性能群。这样，每种适用涂料都有相应的特征性技术性能群，在正交试验结果处理前，首先应该确定该涂料的特征性技术性能数目及其各项性能相应权值。

各种涂料，如耐候性涂料、防水涂料、耐化学涂料、耐热涂料、耐油涂料、电绝缘涂料，或按被涂覆产品定义的，如汽车涂料、机床涂料、船舶涂料、木器涂料，等等，都有相应的国家或行业标准等一系列技术文件，特征性能数目较易确定。因此，在正交试验过程中，最重要且最难的工作是对特征性能确定相应的权值。

权值确定可按专家鉴定的方法进行。邀请 N 位专家，对其特征性能进行鉴定，并按重要性顺序进行排列。则 j 位鉴定人认定的第 i 项性能的权值（M_{ij}）如下：

$$M_{ij} = \frac{1}{l_j}\left[1 - \sum_{k=1}^{m_{ij}} \frac{b_{kij}}{m m_{ij}}(l_j + 1)\right]$$

式中　b_{kij}——j 位鉴定人给第 i 项性能的序号；

l_j——j 位鉴定人认为对本用途来说是重要性的数目；

$k = 1, 2, \cdots, m_{ij}$——j 位鉴定人给第 i 项性能的序号数目。

第 i 项性能的平均权值：

$$M_i = \frac{1}{N}\sum_{j=1}^{N} M_{ij}$$

极值的偏差：

$$\triangle M_i = \pm \left[\frac{B_i - A_i}{N(N-1)}\right]^{\frac{1}{2}} t_{0.9}^{v}$$

式中　$A_i = NM_i^2$；

$B_i = \sum M_{ij}^2$；

$t_{0.9}^{v}$——概率 $p = 0.9$、自由度 $v = N - 1$ 时的学生氏 t 分布。

鉴定人评价的一致性利用 F 分布确定：

$$F = \frac{(C - E)\,l\,(N-1)}{(l-1)(D - C)}$$

式中　$C = \sum_{i=1}^{l} A_i$；

$D = \sum_{i=1}^{l} B_i$；

$E = N/l$。

如果 $F > F_{表}^{v_1, v_2}$，那么当置信度为 5% 时，所有鉴定者的意见没有重大差异。$F_{表}^{v_1, v_2}$ 是 F 分布的表值；$v_1 = l - 1$，$v_2 = l(N-1)$ 分别是最小和最大方差的自由度。

几类涂料的特征能及其权值列于表 1－6－6，供参考。

表 1－6－6　几类涂料的特征性能及权值

特征性技术性能	M_i	ΔM_i
耐候性涂层		
1. 天然条件下的耐候性	0.181	0.028
2. 加速试验方法时的耐候性	0.154	0.018
3. 附着力	0.127	0.01
4. 耐湿性	0.081	0.011

特征性技术性能	M_i	ΔM_i
5. 耐盐雾性	0.072	0.010
6. 耐水性	0.066	0.011
7. 涂层等级	0.055	0.009
8. 光泽	0.053	0.013
9. 吸水性	0.044	0.007
10. 硬度	0.042	0.012
11. 冲击强度	0.038	0.010
12. 柔韧性	0.037	0.010
13. 耐磨性	0.022	0.006
耐水涂层		
1. 应用条件下的稳定性	0.271	0.055
2. 耐水性	0.162	0.021
3. 附着力	0.135	0.022
4. 耐盐雾性	0.106	0.010
5. 吸水性	0.097	0.017
6. 硬度	0.079	0.015
7. 冲击强度	0.063	0.018
8. 柔韧性	0.043	0.016
9. 耐磨性	0.024	0.012
10. 涂层等级	0.012	0.008
耐化学涂层		
1. 在试验室条件下加速试验时对腐蚀性介质的稳定性	0.287	0.060
2. 在应用条件下的稳定性	0.155	0.042
3. 附着力	0.129	0.026
4. 耐水性	0.105	0.025
5. 耐湿性	0.084	0.028
6. 冲击强度	0.072	0.021
7. 硬度	0.054	0.017
8. 柔韧性	0.034	0.014

特征性技术性能	M_i	ΔM_i
9. 耐磨性	0.022	0.010
耐油和耐汽油涂层		
1. 在试验室条件下用加速法评价时的耐油和耐汽油性	0.315	0.052
2. 在应用条件下的稳定性	0.229	0.048
3. 附着力	0.166	0.027
4. 硬度	0.122	0.019
5. 冲击强度	0.064	0.019
6. 涂层等级	0.042	0.014
7. 柔韧性	0.040	0.010
8. 耐磨性	0.020	0.015
耐热涂层		
1. 耐热性	0.335	0.059
2. 应用条件下的稳定性	0.239	0.042
3. 附着力	0.153	0.026
4. 冲击强度	0.116	0.015
5. 柔韧性	0.074	0.017
6. 硬度	0.056	0.012
7. 涂层等级	0.015	0.010
电绝缘涂层		
1. 电击穿强度	0.278	0.060
2. 电阻	0.208	0.023
3. 应用条件下的稳定性	0.160	0.031
4. 介电常数	0.112	0.022
5. 附着力	0.088	0.013
6. 介电损耗角的正切	0.081	0.014
7. 柔韧性	0.045	0.015
8. 硬度	0.040	0.018

权值确定也可以按照 T.L.Saaty 的两两对比法（见表 1－6－7）来进行：

$$M_i = \frac{1}{N}\sum_{j=1}^{N}\left[\frac{a_{ij}}{\sum_{i=1}^{N} a_{ij}}\right]$$

式中　M_i——第 i 项因素权值；

N——同层次因素个数；

i——行号；

j——列号；

a_{ij}——第 i 项因素和第 j 项比较时，重要性程度值。

说明：若 i 与 j 比较时，重要性程度是 x 倍，则 j 与 i 比较时，重要性程度为其倒数（1/x 倍）。

表 1－6－7　T.L.Saaty 的相对重要性表

相对重要程度	定义	说明
1	同等重要	二者贡献相等
3	略为重要	按经验，一个比另一个稍有利
5	基本重要	按经验，一个比另一个更有利
7	确定重要	实践证明，一个比另一个更有利
9	绝对重要	明显重要，可以断定为最高
2、4、6、8、10	相邻程度的中间值	需折中采用

例 9：试用正交试验评定丙烯酸树脂的合成条件（单体比例、BPO 用量、保温时间）。性能评价结果以附着力、硬度、冲击强度、柔韧性等综合表示。

解　（1）确定权值。根据经验或有关资料，将确定的重要性程度值 a_{ij} 列于表 1－6－8 中。按公式求出各因素的权值。

表 1－6－8　重要性程度值

i \ j / a_{ij}		1	2	3	4	权值（M_i）
		附着力	硬度	冲击强度	柔韧性	
1	附着力	1	2	2	3	0.4227
2	硬度	1/2	1	1	2	0.227
3	冲击强度	1/2	1	1	2	0.227
4	柔韧性	1/3	1/2	1/2	1	0.122
$\sum_{i=1}^{N} a_{ij}$		2.33	4.5	4.5	8	

（2）计算综合性能值。综合性能满分以 100 分计，

①附着力满分：$100 \times 0.423 = 42.3$

1 级为 42.3，7 级为 0 分

②硬度满分：$100 \times 0.227 = 22.7$

硬度分 = 硬度值 $\times 0.227$

③冲击强度满分：$100 \times 0.227 = 22.7$

50kg·cm 为 22.7 分，0kg·cm 为 0 分

④柔韧性满分：$100 \times 0.122 = 12.2$

1mm 为 12.2 分，5mm 为 4 分，15mm 为 0 分

（3）按 L_9（3^4）。正交试验表安排各因素组合的全部试验。试验安排及结果处理见表 1－6－9。

表 1－6－9　试验安排及结果处理

列号 / 实验号	各因子的水平组合			合性能分
	A	B	C	
1	A_1	B_1	C_3	64.2
2	A_2	B_1	C_1	62.6
3	A_3	B_1	C_2	54.9
4	A_1	B_2	C_2	64.9

列号 / 实验号	各因子的水平组合			合性能分
	A	B	C	
5	A_2	B_2	C_3	64.1
6	A_3	B_2	C_1	62.9
7	A_1	B_3	C_1	62.0
8	A_2	B_3	C_2	49.1
9	A_3	B_3	C_3	61.9
Ⅰ	191.1	181.7	187.5	总分 Ⅰ+Ⅱ+Ⅲ=546.6
Ⅱ	175.8	191.9	168.9	
Ⅲ	179.7	173.0	190.2	
极差 R	11.4	18.9	21.3	

结果处理表明，因子 B 和 C 影响作用较大，因子 A 的影响作用一般，可能的组合为 $A_1B_2C_3$。重复试验可能的配方，核实其效果并比较误差。

若验证效果不如表中最好配方，则情况比较复杂，需改试其他因素；若误差大，需要重复做九次试验，确定是系统误差还是偶然误差。若是系统误差，说明其他某一因素发生了显著变化，需找出该因素；若是较大的偶然误差，应改试其他条件（此时用量偏向趋势也不可靠）。

二、线性规划法

利用线性规划法可以解决涂料在某些性能指标以上的最低成本的配方问题。即在配方试验中，随时考虑产品成本问题。因而试验次数最少，获得最终配方的组分也最少。

线性规划法是基于这样一个事实：某一组分的浓度与涂料的相关特性之间的关系，在浓度范围变窄的情况下，接近于呈线性函数关系。这样我们可以建立如下线性方程组：

$$c_1x_1 + c_2x_2 + \cdots + c_nx_n = \min Z$$

$$a_{11}x_1 + a_{12}x_2 + \cdots + a_1nx_n \geqslant b_1$$

$$a_{21} + a_{22}x_2 + \cdots a_{2n}x_n = b_2$$

$a_{m1}x_1 + a_m2x_2 + \cdots + a_{mn}x_n \leqslant b_m$

系数 c_1，c_2，…，c_n 分别是各组分（x_1，x_2，…，x_n）的单位价格，a_n，…，a_{mn}是组分分别受 b_1，…，b_m 性能值约束的约束方程的常量（约束方程可以是等于号、大于等于号或小于等于号）。要解决的问题是解约束方程各变量（x_1、x_2，…，x_n）值，并满足涂料总成本（Z）为最小值。

首先，拟定涂料的组分和配比，配漆后检验得到一系列性能值。如果 y 性能值未达指标（y_0）并明确知道 x 与 y 之间存在着某种关系，则把它们当作线性关系来处理：

$$y = ax$$

利用试验值（x，y）（1）解得约束方程常量 a。再将 y_0 作为性能常量建立线性方程组，解得 x（2）。将此配方进行第二次配漆和性能检验，得 y（2）。

因为已经有二次实验数据：（x，y）（1）和（x，y）（2），可建立如下线性方程：

$$y = ax + d \quad \text{或} \quad y = ax_1 + dx_2$$

解得常数 a 和 d。再解线性方程组可得第三个配方。此配方应该更接近于符合性能指标的配方。随着实验往下进行，所设定的线性方程也越来越接近于表述组分与性能之间的真实关系，因而终将能够得到一成本最低且符合性能指标的配方。

很明显，如果我们最初拟定的配方与目标相近的话，那么只要极少次数实验就能达到期望结果。

例　试用线性规划法试验一个具有最低成本的符合如下性能指标的丙烯酸白漆。

固体分	37.5%	黏度	25.7s
遮盖力（0～8 级）	8 级	硬度（洛氏）	17.3
附着力（0～10 级）	8 级	冲击强度	103mm
抗挠曲性	通过 3.2mm 轴		

解　根据经验，拟定配方如表 1－6－10 所示。按成本，建立如下

表 1－6－10　根据试验拟定的配方

配方		1	2	3	4
x1	TiO_2	0.1529	0.1370	0.1373	0.1372
x2	MMA	0.0894	0.1731	0.1404	0.1551
x3	EA	0.1333	0.0647	0.0928	0.0789
x7	AA	—	—	0.0048	0.0036
x4	BPO	0.00046	0.00033	0.00029	0.00024
x5	甲苯	0.3124	0.3124	0.3124	0.3124
x6	醋酸乙酯	0.3124	0.3124	0.3124	0.3124
性能	遮盖力	9（8）	8（8）	8（8）	8（8）
	硬度	15.0（17.6）	18.3（17.2）	16.5（17.3）	17.7（17.3）
	黏度	19.2（25.5）	23.5（25.5）	24.3（26.0）	26.1（25.8）
	附着力	3（8）	3＜8）	10（8）	9（8）
	冲击强度	＞1000（120）	40（100）	＞1000（90）	＞1500（100）
	抗挠曲性	通过 Φ3.2mm	通过 Φ3.2mm	通过 Φ3.2mm	通过 Φ3.2mm

注：括号内为每次配方计算预定要达到的性能值。为了使组分用量更快地达到目标值，可针对每次试验值，按最终目标值做适当增、减。

不变的线性方程：

$$70.0x_1 + 55.0x_2 + 70.0x_3 + 269.0x_4 + 16.8x_5 + 46.3x_6 = Z$$

约束方程如下：

$x_1 + x_2 + x_3 + x_4 + x_5 + x_6 = 1$（不变方程）

$0.625(x_1 + x_2 + x_3 + x_4) - 0.375(x_5 + x_6) = 0$（按固体分设定，不变方程）

$x_5 - x_6 = 0$（按 $x_5 : x_6 = 1:1$ 设定，不变方程）

$58.86x_1 \geqslant 8.0$（按 TiO_2 与遮盖力之间的线性关系 $a_1x_1 = y_1$ 确定 a_1）

$167.8x_2 \geqslant 17.6$（按 MMA 与硬度之间的线性关系 $a_2x_2 = yz$ 确定 a_2）

$113.2x_4 = 0.039$（按 BPO 与黏度之间的反比关系 $a_4x_4 = 1/y_4$ 确定 a_4）

由于其他性能与组分之间的关系不明确，故没有设立约束方程。

解方程组可得配方 2，依实验结果建立如下约束方程组：

$$x_1 + x_2 + \cdots + x_6 = 1$$

$0.625（x_1 + x_2 + x_3 + x_4）- 0.375（x_5 + x_6）= 0$

$x_5 - x_6 = 0$

$0.2378x_1 - 0.1370（x_2 + x_3）= 0$ **[因遮盖力已达要求，按** $x_1/（x_2 + x_3）= 0.1370/0.2378$ **确定不变方程]**

$39.43x_2 = 5.73$ **（按** $a_2x_2 + d_2 = y_2$ **确定** a_2、d_2**）**

$33077x_4 = 8.9$ **（按** $a_4x_4 + d_4 = 1/y_4$ **确定** a_4、d_4**）**

解以上方程组得配方 3**。为了改善附着力，就** MMA **硬组分，用部分** AA **替代并试验。由于拼入了** AA **组分（**x_7**），前面的不变方程应进行调整。线性方程组如下：**

$70.0x_1 + 55.0x_2 + 70.0x_3 + 269x_4 + 16.8x_5 + 46.3x_6 + 51.0x_7 = Z$

$x_1 + x_2 + \cdots + x_7 = 1.0$

$0.625（x_1 + x_2 + x_3 + x_4 + x_7）- 0.375（x_5 + x_6）= 0.0$

$x_5 - x_6 = 0$

$0.2378x_1 - 0.137（x_2 + x_3 + x_7）= 0.0$

$55.1x_2 = 8.5$ **（按** $a_2x_2 + d_2 = y_2$ **确定）**

$20000x_4 = 4.6$ **（按** $a_4x_4 + d_4 = 1/y_4$ **确定）**

$1458x_7 = 5$ **（按** $a_7x_7 + b_7 = y_4$ **确定）**

解以上方程组得配方 4**，试验后表明配方已符合产品质量要求。**

对于约束方程有大于等于或小于等于号时，应采用单纯形法并借助计算机求解。

第四节　配　　色

一、颜色基本概念

（一）光与色的关系

颜色是人眼视神经受到光线刺激引起兴奋，传至大脑中枢神经进行信息

处理后产生的视觉感。因此，有光才有色，无光便无色。可见光的波长范围在380～780nm之间。由于光子能量与波长成反比（$E = ch/\lambda$，h、c为常数），因此不同波长的光，能量是不同的，使人眼视觉感出现差别。如果我们用棱镜来分离可见光，可得彩虹样的色带，各色带的波长范围如下：

红色	780～627nm	绿色	550～480nm
橙色	627～589nm	蓝色	480～450nm
黄色	589～550nm	紫色	450～380nm

不同波长的光线射入眼睛后，接受到的信息发生变化，观察到不问光的相加混合色。若用颜色环中两个相对颜色的互补光等量混合，变成白色；用一对非互补的光混合，变成其他混合色；若用多种色光混合，则趋向于白色。若有三种色光以不同比例混合，能产生颜色环中的所有颜色的混合色，则这三种颜色称为三原色。三原色中任意两种颜色的混合色必是另一色的补色。最好的三原色光是红、绿、蓝三色，由它们产生的白光，跟连续光谱产生的白光视觉效果一样。虽然视觉感都是白色，但由于三原色混合成的白光不是连续光谱，此类现象称为同色异谱现象。通常，只要两种异谱色的颜色视觉感受相同，我们就认为这两种颜色已经匹配，匹配所用的三原色数量称为三刺激值。

（二）物体颜色的呈现

当可见光照射到物质表面的时候，它会吸收一部分色光，反射、折射或透射其他波段的光，这样物质就呈现出未被吸收波长区域光的颜色。由于各类物质对不同波长光的吸收能力、反射能力、折射能力都是不同的，所以各种物体都有其特定的色彩。

不透明物体吸收和反射的色光是互补的；透明物体吸收、反射与透射三部分色光互补；珠光颜料由于折射多种色光产生干涉色，具有丰富的色彩效果。

微细的颜料颗粒由于散射和透射作用小，所以它的颜色主要是由反射决定的。反射分镜面反射和漫反射，镜面反射决定物体外表光泽，漫反射决定物体的外表色彩。

当两种颜色的颜料混合时，光谱中有两种色光波段被吸收，只呈现剩余波段光颜色。因此，颜料配色是相减混合。当两种互补色混合，光谱全被吸收，呈黑色；若多种色颜料混合，使绝大部分光谱成分被吸收，颜色趋暗，甚至变成黑色。用非互补色颜料混合，呈现该两色的中间色。因此，用三原色颜料也可配出各种色调。颜色配色的三原色是红、黄、蓝。绿色颜料吸收的色光是红色和紫色，因此绿色没有互补的单色光。

（三）颜色的特性与表示

颜色有三个显著的视觉特性，即色相、明度和纯度，又称颜色三属性。

色相：亦即色调。它取决于物体表面对各种波长色光的反射比例，跟光源的光谱组成也有关系，是色彩视觉属性。

明度：即色光的明暗程度。它取决于物体对光的反射能力，是光强度的视觉属性。反射率达 80% ~ 90%时，对人眼刺激强烈，已感觉是白色；反射率低至 4%时，吸光性很强，则感觉已是黑色。色光中，红色、黄色光反射较强，对人眼刺激大，显得较明亮。光源亮度增加，也能使色光的明度增加。

纯度：又称饱和度。它表示彩色的纯正程度。色彩中，单色光是最饱和的色；而白色、黑色、灰色是饱和度最低的无彩色，又称中性色。纯色掺人中性色，饱和度下降，甚至会被掩盖而只能感受到中性色。纯度取决于物体表面对光反射的选择性程度。若物体反射光波段很窄，则反射选择性高，色的饱和度也高。

根据颜色的三属性，可用 Munsell 颜色立体模型（见图 1 - 6 - 8）来表示各种颜色。纵轴为明度，分为 10 级（白为 10、灰为 5、黑为 0）；以灰点作为中点，设一水平圆，以半径方向表示纯度（亦称彩度），数值为 0 ~ 20；水平圆的不同位相代表色调，共分 10 个色调：红（R）、黄（Y）、绿（G）、蓝（B）、紫（P）、黄红（YR）、绿黄（GY）、蓝绿（BG）、紫蓝（PB）、红紫（RP）；各色调间又分成 10 等份，圆周上共有 100 个刻度。颜色按“色调·明度/彩度”来表示。例如，5Y9/10 表示该颜色的色调为 5Y、明度为 9、彩度为 10，是一种纯度较高且明亮的黄色，此表示方法称为 Munsell 颜

色系统。

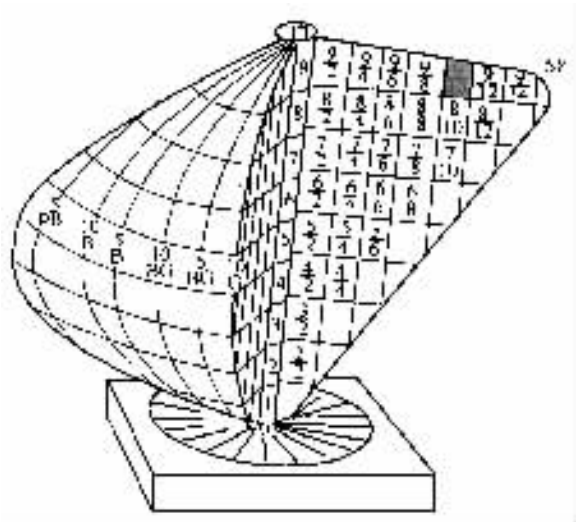


图 1－6－8　Munsell 颜色立体模型示意图

按照颜色的光谱特征，也可以用 CIE 标准色度学系统进行精确表述。该方法是将三原色光投射于白板上，不断增减，使之与标准光源照射下的相邻色板颜色完全匹配，用匹配时三原色的量（即三刺激值）表示该色板的颜色。

由于三原色光波长、光源、白板及人眼视觉能力都影响匹配的观察结果，故规定色光为：红 700.0nm、绿 546.1nm、蓝 435.8nm；标准光源分 A、B、C 三种，其中 A 光源为色温 2856K 的充气白炽钨丝灯；白板和标准观察者都有相应规定。

匹配所需三原色的数量以 X、Y、Z（三刺激值）表示：

$$X = \int_{\lambda} S(\lambda)\, R(\overline{\lambda})\, \overline{x}(\lambda)\, d\lambda$$

$$Y = \int_{\lambda} S(\lambda)\, R(\overline{\lambda})\, \overline{x}(\lambda)\, d\lambda$$

$$Z = \int_{\lambda} S(\lambda)\, R(\overline{\lambda})\, \overline{x}(\lambda)\, d\lambda$$

式中　S（λ）——光源的相对光谱功率分布；

R（Rλ）——色板的光谱反射率；

$\bar{x}(\lambda)$、$\bar{y}(\lambda)$、$\bar{z}(\lambda)$ ——分别是红、绿、蓝三原色的颜色匹配函数（亦称光谱三刺激值）；

$\int_{\lambda}$ ——在整个可见光波长范围内积分。

在色度学中，往往用色度坐标 x、y、z（即相对比例）来表示：

$$x = \frac{X}{X+Y+Z}，\ y = \frac{y}{X+Y+Z}，\ z = \frac{Z}{X+Y+Z}$$

（四）颜色的测量

1. 目测法

就是在标准光源下，将被测颜色与 Munsell 标准图谱进行比较，按 Munsell 颜色系统表示其色相、明度和纯度。这是一种简单常用的近似方法。由于观察者生理状态的差别，每个人的比较结果是不一样的。用肉眼辨别纯度比较困难，在不同的光源下，得到的色相和明度也是不一致的。

2. 仪器测量

用分光光度测色仪（即分光光度计）进行测量。仪器分单色器和光度计两部分，单色器用以产生单色光，光度计测量该单色光在标准样（如标准白板）和待测样表面反射能力的差别，即反射率 R（λ）。计算机将内部贮存的标准光源的 S（λ）$\bar{x}$（λ）、S（λ）$\bar{y}$（λ）及 S（λ）$\bar{z}$（λ）值与显示的 R（λ）相乘，并在可见光波长区域内进行积分，便得被测样的三刺激值或色度坐标。

另外，可用光电色度计和色差计进行测量。、这是两类使用比较方便的客观色度计，其探测器的灵敏度都经滤色器，校正到与 CIE 标准观察者的 $\bar{x}$（λ）、$\bar{y}$（λ）、$\bar{z}$（λ）三个颜色匹配函数相一致，故仪器可将获得的反射讯号直接转换成三刺激值或色度坐标。

二、配色

配色是涂料生产过程中重要的一道工序。一般先制成颜色相近的色漆，再细致、逐步地将适宜的调色浆混入到色漆中，使之达到规定颜色。对涂料

使用者来说，是用三原色漆调配成样板规定的颜色。

配色有人工配色和计算机配色两种。人工配色是一项精细的工作，调色的难易程度跟调色者的经验积累有极大的关系。例如调色者的辨色能力及对成色规律的掌握，决定了他是否能胜任该项工作。因此，无论是颜色的辨别和对比，还是颜色的混合操作，都必须按一定规则来进行。

配色的操作过程如下：

（1）确定标准光源、色卡或标准样板。在标准光源下进行辨色，确定样板的色相、明度和纯度，然后确定它的主色是什么，根据成色规律确定需要哪些调色料。另外，标准样板的面积应大些，这样比色时，色相、明度和纯度都较有层次，比色就较为准确。

（2）准备调色料（如果用色漆，则各色都应是同类漆基）和调电工具，并对色料颜色进行对比。

（3）先配小样，确定所需颜色的主次顺序和配比。

（4）配色时应遵循“先主后次，由浅入深”这一要点来进行。即先配主色（或底色），然后依次加入其他色调至基本色相，再按“由浅入深”分别调整色相、明度和纯度。

例如：浅湖绿色由浅黄、铁蓝、钛白和软黑组成，则先后加钛白、浅黄及少量铁蓝调出色相，再分别细致地加入铁蓝和软黑，调整色相、明度与纯度。一旦色相基本调出以后，明度与纯度的调整就比较容易了。

调配各类颜色所需常用颜料比例参见表 1－6－11，仅供参考。

颜料在色漆中所需质量份根据其遮盖力确定。一般以深色漆一道，浅色漆二道，漆膜厚度 25μm 能遮盖底色为准。遮盖力小或密度大的颜料要多加。普通色漆中几种常用颜料用量大致如下：$TiO_2 > 18\%$，炭黑 3%～4%，铁蓝 9%～11%，酞菁蓝 4.5%～9%，中铬黄 > 23%，浅铬黄 > 27%，柠檬黄 > 28%，汉沙黄 > 13%，甲苯胺红 11%～13%，铁红 > 18%，铝粉 16%。

人工配色时受人为因素的影响，准确性差，所以最好能采用计算机配色。计算机配色需采用 Kubelka－Munk 函数：

$$\frac{K}{S}=\frac{(1-R_\infty)^2}{2R_\infty}$$

式中　K——对久波长光的吸收函数；

S——对入波长光的散射系数；

R_∞——涂膜厚度远大于颜料粒径时对又波长光的反射率。

虽然 R 与颜料配比无线性关系，但 K、S 与颜料配比有线性关系：

表 1－6－11　部分颜色的各类颜料配比

颜色	TiO_2	铁蓝	中铬黄	炭黑	浅铬黄	铁红	甲苯胺红
珍珠白	98.10		1.90				
奶油白	93.77		5.88			0.35	
米黄	80.03		18.58			1.39	
浅黄					100		
黄色			100				
橙色			77.12				22.88
红色							100
铁红						100	
黄棕			45.16	1.51		53.33	
棕色			9.76	1.48		88.76	
中绿		11.34	4.94		83.72		
绿色		15.90	10.57		73.53		
深绿		30.10	16.24		53.66		
军绿		7.41	62.56			30.03	
湖绿	74.94	1.82			23.24		
豆青	69.53	3.32			27.15		
果绿	80.20	0.57			18.45	0.78	
浅绿		6.91	5.73		87.36		
豆灰	76.81	2.05	19.69	1.45			
湖蓝	87.75	2.50	2.26		7.49		
海蓝	60.00	27.94	12.06				
中蓝	71.75	28.25					
银灰	95.37	0.75	2.75	1.13			
浅灰	96.89	0.52		2.59			

颜色	TiO_2	铁蓝	中铬黄	炭黑	浅铬黄	铁红	甲苯胺红
蓝灰	91.54	3.81		4.65			
深灰	88.03	0.97		11.00			

注：12 类颜料按其着色力大小换算如下：铁蓝∶群青∶酞菁蓝 = 100∶1200∶50；铬黄∶汉沙黄 = 100∶20；铬绿∶酞菁绿 = 100∶50；锌钡白∶钛白 = 100∶16。

$$K = \sum_i C_i K_i \text{；} S = \sum_i C_i S_i \quad (i = 1, 2, \cdots, m)$$

因此

$$\frac{K}{S} = \frac{\sum_i C_i K_i}{\sum_i C_i S_i}$$

由于颜料的散射系数（S_i）很小，并且基本相等，故把各类颜料 S_i 看作常数 S。

则

$$\frac{K}{S} = \sum_i C_i \frac{K_i}{S}$$

在可见光范围内，以 $\Delta\lambda = 10nm$ 进行分割，则有 n 个波长点，第 j 个波长点有：

$$\frac{K_i}{S_i} \sum_{ij} C_i \frac{K_{ij}}{S_j} \quad (j = 1, 2, \cdots, n)$$

由于混合色与标准样匹配为同色异谱，故 Δx、Δy、Δz 有极小值，设为 C_{m+1}，则有线性方程组：

目标函数

$$F(C) = \min C_{m+1}$$

约束方程

$$C_1 + C_2 2 + \cdots + C_m = 1$$

$$|\Delta x| \leqslant C_{m+1}$$

$$|\Delta y| \leqslant C_{m+1}$$

$$|\Delta z| \leqslant C_{m+1}$$

$$C_1, C_2, \cdots, C_{m+1} \geqslant 0$$

式中 $\Delta x = \int S(\lambda)\, x(\lambda)\, \Delta R(\lambda)\, d\lambda$；

$\Delta y = \int S(\lambda)\, y(\lambda)\, \Delta R(\lambda)\, d\lambda$；

$\Delta z = \int S(\lambda)\, z(\lambda)\, \Delta R(\lambda)\, d\lambda$。

在色差不大时：

$$\Delta R \approx dR = \frac{dR}{D(K/S)} \times \Delta \left(\frac{K}{S}\right)$$

而
$$\frac{d\left(K/S\right)}{dR} = -\frac{1}{2}\left(1+\frac{1}{R^2}\right)$$

$$\Delta\left(\frac{K}{S}\right) = \left[\left(\frac{K}{S}\right)_{标准} - \left(\frac{K}{S}\right)_{混合}\right] = \left[\left(\frac{K}{S}\right)_{标准} - \sum_i C_i \frac{K_i}{S}\right]$$

故
$$\Delta x = \sum_j S\left(\lambda\right)\bar{x}\left(\lambda\right)\left[\frac{-2}{1+\frac{1}{R_j^2}}\right]\left[\left(\frac{K_j}{S_j}\right)_{标准} - \sum_{ij} C_i \frac{K_{ij}}{S_j}\right]\Delta\lambda$$

$$\Delta y = \sum_j S\left(\lambda\right)\bar{y}\left(\lambda\right)\left[\frac{-2}{1+\frac{1}{R_j^2}}\right]\left[\left(\frac{K_j}{S_j}\right)_{标准} - \sum_{ij} C_i \frac{K_{ij}}{S_j}\right]\Delta\lambda$$

$$\Delta z = \sum_j S\left(\lambda\right)\bar{z}\left(\lambda\right)\left[\frac{-2}{1+\frac{1}{R_j^2}}\right]\left[\left(\frac{K_j}{S_j}\right)_{标准} - \sum_{ij} C_i \frac{K_{ij}}{S_j}\right]\Delta\lambda$$

（$j=1，2，\cdots，n，i=1，2，\cdots，m$）

采用对偶单纯形法解线性方程组，可得最佳配方，即匹配时的各 C_i（$i=1，2，\cdots，m$）值。

计算机配色只适合本色漆，对于金属闪光漆和珠光漆等光效应颜色，主要还是靠人工调配。其中金属闪光漆非常耀眼，添加超细二氧化钛会变得柔和，色彩层次更加丰富。汽车用金属闪光漆和珠光漆等各光效应颜色的颜料配比（单位：%）举例如下：

（1）银灰色 1；

铝粉（Silberline SS－3333AR）	94.6	酞菁蓝 B	0.55
炭黑	0.55	喹吖啶酮红	0.10

（2）银灰色 2；

铝粉（Silberllne SS－5000AR）	75.09	炭黑	微量
金红石钛白粉（R960）	24.91	酞菁绿（带黄相）	微量
透明氧化铁红	微量		

（3）浅灰色；

超细二氧化钛（20～30nm）	63.44	炭黑	2.53
铝粉浆	34.03		

（4）中灰色；

超细二氧化钛（20～30nm）	59.56	炭黑	8.56
铝粉浆	31.18		

（5）银色；

超细二氧化钛（20～30nm）	64.02	苝桃红	
铝粉浆	34.78		

（6）红色1；

铝粉（Silberline L－582）	22.00	透明氧化铁红	46.00
喹吖啶酮红	32.00		

（7）红色2；

铝粉（Silberline SS－3141AR）	24.17	透明氧化铁红	9.27
苝桃红	51.66	咔唑二噁嗪紫	0.99
喹吖啶酮紫	13.91		

（8）红色3；

铝粉（Silberline SS－3124AR）	6.45	透明氧化铁红	25.47
铝粉（Reynolds #8－332）	15.99	苝橙黄	
苝桃红	19.22	灯黑	0.30
喹吖啶酮红	31.28		

（9）桃红色；

铝粉（Silberllne SS－3141AR）	15.00	透明氧化铁红	
苝桃红	61.00	炭黑	1.00

（10）黄铜色；

铝粉（Silberline L－582）	33.76	透明氧化铁红	51.47
喹吖啶酮褐红	14.77		

（11）金黄色；

铝粉（Silberline SS－333AR）	24.63	炭黑	0.89
透明氧化铁红	32.92	酞菁绿（带黄相）	5.31
黄烷士酮黄	36.25		

（12）浅金色；

超细二氧化钛（20～30nm）	61.33	透明氧化铁红	5.78
铝粉浆	32.89		

（13）金色；

超细二氧化钛（20～30nm）	56.61	透明氧化铁红	12.41
铝粉浆	29.83	炭黑	2.15

（14）橙色；

铝粉（Silberline SS－3141AR）	20.31	喹吖啶酮褐红	14.77
透明氧化铁红	44.36	喹吖啶酮橙	35.33

（15）浅蓝色；

铝粉（Silberline L－582）	91.14	阴丹士林蓝	6.24
酞菁蓝（带红相）	2.62		

（16）深蓝色；

铝粉（Alcoa #7470）	37.53	炭黑	6.37
酞菁蓝（带绿相）	43.90	葸嘧啶黄	1.47
酞菁蓝（带红相）	9.80	咔唑二噁嗪紫	0.93

（17）深紫色；

铝粉（Silberline SS－3141AR）	9.35	咔唑二噁嗪紫	35.40
酞菁蓝（带绿相）	54.85	炭黑	0.40

（18）棕色；

铝粉（Silberline SS－5000AR）	7.31	喹吖啶酮红	16.96
透明氧化铁红	18.92	炭黑	1.96
有机棕	54.85		

（19）黄棕色；

铝粉（Silberline SS－3333AR）	6.53	喹吖啶酮红	11.09
铝粉（Reynolds #8－332）	1.58	喹吖啶酮桃红	6.34
透明氧化铁红	73.27	炭黑	1.19

（20）深棕色；

铝粉（Silberliline SS－3141AR）	11.70	炭黑	11.20
透明氧化铁红	71.10	苝桃红	6.00

（21）浅绿色；

铝粉（Silberline L－582）	87.18	透明氧化铁黄	10.14
酞菁绿	1.96	灯黑	0.72

（22）亮绿色；

铝粉（Silberline SS－3141AR）	39.99	灯黑	0.32
透明氧化铁黄	25.41	酞菁绿（带黄相）	6.52
黄烷士酮黄	27.76		

（23）金刚黑色；

珠光粉（Iriodin/affflair9103 银白 WR，10～40μm）	20.00	炭黑	30.00
		靛蒽醌蓝（阴丹士林蓝）	30.00
铝粉	5.00	透明氧化铁	15.00

（24）米白色；

珠光粉（Iriodin/affflair9103 银白 WR，		透明氧化铁	5.00

10～40μm）	40.00	炭黑	微量
铝粉（中粒度）	55.00	钛白粉	微量

（25）中蓝色；

珠光粉（Iriodin/afflair 9225 蓝 WR，		酞菁蓝	30.00
10～40μm）	20.00	炭黑	10.00
铝粉（中粒度）	40.00		

（26）翠绿色；

珠光粉（Iriodin/afflair 9235 绿 WR，		酞菁绿	30.00
10～40μm）	30.00	炭黑	5.00
酞菁蓝	35.00		

（27）深艳红色；

珠光粉（Iriodin/afflair 9504 红 WR，		喹吖啶酮红	10.00
10～40μm）	65.00	驼紫红	15.00
珠光粉（Iriodin/afflair 9505 红紫 WRⅡ，		炭黑	5.00
10～40μm）	5.00		

（28）亮红色。

珠光粉（Iriodin/afflair 9504 红 WR，		喹吖啶酮紫	15.00
10～40μm）	65.00	驼紫红	5.00
透明氧化铁	15.00	炭黑	5.00

汽车用本色漆各色的颜料配比（单位：%）举例如下：

（1）红色 1；

Krolor 中橙	92.71	钛白粉	2.68
喹吖啶酮紫	4.61		

（2）红色 2；

喹吖啶酮红	67.37	钛白粉	7.92
KroIOr 中橙	24.71		

（3）橙色；

钼铬红	98.48	灯黑	0.01
喹吖啶酮紫	0.97	钛白粉	0.54

（4）黄色 1；

钛白粉	67.63	铁黄	20.92
蒽素嘧啶黄	11.45		

（5）黄色 2；

中铬黄	74.10	钛白粉	67.63

咪唑橙	0.90		

（6）深蓝色；

酞菁蓝（带绿相）	44.30	钛白粉	5.39
铁蓝	44.30	铁黄	6.01

（7）蓝色；

钛白粉	86.50	灯黑	1.74
酞菁蓝（带红相）	9.83	咔唑二噁嗪紫	1.93

（8）浅蓝色；

钛白粉	98.67	喹吖啶酮红	0.25
酞菁蓝（带红相）	0.59	酞菁绿	0.41
灯黑	0.08		

（9）深棕色；

Krolor 浅橙	72.14	铁黄	19.78
酞菁蓝（带红相）	8.08		

（10）浅灰绿色。

钛白粉	60.13	酞菁绿	1.67
Krolor 中黄	38.20	灯黑	微量

以上颜料混合比例仅供参考，一般来说，各色颜料组合的经验规律如下。

（1）灰色：铝粉 + 钛白粉。

（2）黄色和金黄色。

本色；蒽素嘧啶牛铬黄；

金属色：铝粉牛黄烷士酮 + 透明氧化铁黄 + 酞菁绿。

（3）橙色和铜色。

本色：咪唑橙 + 钼铬红；

金属色：铝粉 + 喹吖啶酮金黄 + 透明氧化铁黄；

铝粉牛黄烷士酮 + 透明氧化铁红。

（4）红色和桃色（洋红），

本色：喹吖啶酮红（或紫、或洋红） + 钼铬红；

硫靛红 + 铁红；

金属色：铝粉 + 喹吖啶酮紫 + 茜洋红；

铝粉 + 喹吖啶酮红 + 透明氧化铁红。

（5）蓝色和紫色。

本色：铁蓝斗酞菁蓝；

咔唑二嗯嗪紫 + （酞菁蓝 + 阴丹士林蓝）或阴丹士林蓝；

金属色：铝粉 + 酞菁蓝 + 阴丹士林蓝；

铝粉 + 喹吖啶酮红牛酞菁蓝。

（6）棕色。

本色：铁蓝 + 钼铬红；

金属色：铝粉 + 有机棕 + 透明氧化铁红；

铝粉 + 苊橙 + 透明氧化铁红；

铝粉 + 苊橙 + 酞菁绿。

（7）绿色。

本色：酞菁绿 + 铬黄；

金属色：铝粉 + 黄烷士酮 + 酞菁绿 + 透明氧化铁红或铁黄；

铝粉 + 镍（或铜）络偶氮黄牛酞菁绿 + 透明氧化铁红

混合颜料就其颜料种类、用量及冲淡色颜料（如钛白粉和铝粉等）的多寡，对涂膜的光泽、耐潮湿性和耐候性会产生增效作用或对消现象。颜料的对消现象在耐候性试验时，容易产生褪色、古铜色并形成金属那样的反光表面或表面粉化，上述例子通常是产生增效作用。例如，喹吖啶酮洋红和透明氧化铁黄单独在金属漆中使用时，耐候试验分别产生褪色和严重的古铜色，混合时（喹吖啶酮洋红/透明氧化铁黄/铝粉 = 46.59∶38.31∶15.10）有增效作用，其耐候性良好。铁蓝/酞菁蓝的深蓝色及喹吖啶酮红/钼铬红的红色在本色漆中是有实际应用的，但不推荐在金属漆中使用。虽然通过颜料的配合能产生众多的色彩，以弥补我们所需颜色的不足，或某种颜色可用不同种类颜料组合来产生，但前提是混合颜料必须产生增效作用。

汽车涂料等本色和金属色涂料，为了追求更加清澈、亮丽和更丰富的色彩，或为了采用无铬化颜料，采用了更多的颜料来配色，这种新的颜料组合、颜料用量，甚至是基料种类的不同，有可能使色彩纯度丧失、光泽污浊，或在潮湿试验和耐候性试验时造成光泽下降、褪色及表面出现古铜色、气泡、粉化和开裂现象。上述实例都针对热固性丙烯酸涂料而言，对于加催化剂、低温烘烤及修补涂料，在潮湿试验易出现发白引起的光泽下降。因

此，对于新的颜料组合，不仅色彩要满足客户需求，同时必须对涂膜性能进行考核试验。

以下颜料组合会对光泽产生对消现象：偶氮橙/喹吖啶酮洋红/灯黑 = 74.74/25.23/0.03 红色、钛白粉/蒽素嘧啶黄/铁黄/咪唑橙 = 58.15/24.04/17.42/0.39 黄色、偶氮橙/钛酸铬/蒽素嘧啶黄 = 35，18/48.98/15.84 橙色、喹吖啶酮红/驼橙/苯洋红/透明氧化铁红/铝粉：35.52/22.09/9。30/24.97/8.12 闪光红、铝粉/酞菁蓝/炭黑 = 98.5/1.3/0.2 银色。

以下颜料组合会在潮湿试验时产生对消现象：铁黄与黄烷士酮、异吲哚啉酮或蒽素嘧啶的黄色；黄烷士酮、蒽素嘧啶黄和/或异吲哚啉酮的黄色；铁红与喹吖啶酮红（或紫）的深红和洋红色；蒽素嘧啶黄与透明氧化铁黄的浅至中灰闪光黄。

以下颜料组合会在耐候性试验时产生对消现象：透明氧化铁/酞菁绿的金色和深绿色闪光色（古铜色）；苯洋红与喹吖啶酮红的闪光红（褪色和古铜色）；镍或铜络偶氮与酞菁绿的浅至中闪光绿（褪色）；黄烷士酮与蒽素嘧啶黄和/或异吲哚啉酮的黄色（粉化）。

以下颜料组合会造成起始光泽低并产生耐候性问题：铝粉与有机颜料（酞菁、黄烷士酮、蒽素嘧啶）的银色和极淡的金属色涂料会发浑；喹吖啶酮（黄至紫色相）与黄烷士酮和单偶氮橙的红色；驼橙和苯洋红与喹吖啶酮（黄至紫色相）和透明氧化铁红的闪光深红、闪光黄褐色及闪光棕色。

第七章　船舶涂料

第一节　船舶涂料概述

涂装于船舶内外各部位、以延长船舶使用寿命和满足船舶的特种要求的各种涂料统称为船舶涂料或通常称之为船舶漆。

由于船舶涂装有其自身的特点，因此船舶涂料也应具备一定的特性。

（1）船舶的庞大决定了船舶涂料必须能在常温下干燥。需要加热烘干的涂料就不适合作为船舶涂料。

（2）船舶涂料的施工面积大，因此涂料应适合于高压无气喷涂作业。

（3）船舶的某些区域施工比较困难，因此希望一次涂装能达到较高的膜厚，故往往需要厚膜型涂料。

（4）船舶的水下部位往往需要进行阴极保护，因此，用于船体水下部位的涂料需要有较好的耐电位性、耐碱性。以油为原料或以油改性的涂料易产生皂化作用，不适合制造水线以下用的涂料。

（5）船舶从防火安全角度出发，要求机舱内部、上层建筑内部的涂料不易燃烧，且一旦燃烧时也不会放出过量的烟。因此，硝基漆、氯化橡胶漆均不适宜作为船舶舱内装饰涂料。

一、船舶漆的分类

船舶漆可根据其基料类型、使用部位、作用特点、施工方式等不同方法

进行分类。目前比较通用的分类是按使用部位分类，详见表 1－7－1 所示。

表 1－7－1　船舶漆分类情况

名称		涂料类型	备注
车间底漆		1. 磷化底漆（聚乙烯醇缩丁醛树脂） 2. 环氧富锌底漆 3. 环氧铁红底漆 4. 无机硅酸锌底漆	
水线以下涂料	船底防锈漆	1. 沥青船底防锈漆 2. 氯化橡胶类船底防锈漆 3. 乙烯树脂类船底防锈漆（氯醋三 元共聚树脂） 4. 环氧沥青船底防锈漆	2.、3. 两项常以沥青改性
	船底防污漆	1. 溶解型（沥青、松香、氧化亚 铜） 2. 接触型（氯化橡胶、乙烯树脂、丙 烯酸树脂与氧化亚铜） 3. 扩散型（氯化橡胶、乙烯树脂、丙 烯酸树脂与松香、有机锡） 4. 自抛光型（有机锡高聚物或无锡 高聚物）	
	船用防锈漆	1. 红丹防锈漆（油基、醇酸树脂、酚 醛树脂、环氧酯） 2. 铁红防锈漆（醇酸树脂、酚醛树 脂、环氧酯） 3. 云铁防锈漆（油基、酚醛树脂、环 氧树脂、环氧酯） 4. 铬酸盐防锈漆（油基、醇酸树脂、环氧酯，酚醛树脂）	2. 项常加入铝粉

名称		涂料类型	备注
水线以上涂料	水线漆	1. 酚醛水线漆 2. 氯化橡胶水线漆 3. 丙烯酸树脂水线漆 4. 环氧水线漆 5. 乙烯树脂水线漆 6. 水线防污漆（接触型、扩散型、自 抛光型）	3. 项常以氯化橡胶改性
	船壳漆	1. 醇酸船壳漆 2. 氯化橡胶船壳漆 3. 丙烯酸树脂船壳漆 4. 聚酯树脂船壳漆 5. 乙烯树脂船壳漆 6. 环氧树脂船壳漆	船壳漆主要用于船舶干舷，上层建筑外部和室外船装件 6. 项常生产环氧酯船壳漆
	甲板漆	1. 醇酸、酚醛甲板漆 2. 氯化橡胶甲板漆 3. 环氧甲板漆 4. 甲板防滑漆	
	货舱漆	1. 银舱漆（油基、醇酸树脂与铝粉） 2. 氯化橡胶货舱漆 3. 环氧货舱漆 4. 环氧沥青漆	4. 项常用于货/压载水舱 4. 项用于谷物舱时应采用漂白型环氧沥青漆
	舱室面漆	1. 油基调合漆 2. 醇酸磁漆	用于机舱，上层建筑内部
液舱涂料	压载水舱涂料	1. 沥青漆 2. 环氧沥青漆	
	饮水舱涂料	1. 漆酚树脂漆 2. 纯环氧树脂漆	

名称		涂料类型	备注
液舱涂料	油舱漆	1. 石油树脂漆 2. 环氧沥青漆 3. 环氧树脂漆 4. 聚氨酯树脂漆 5. 无机锌涂料	1. 适用于燃油舱 2. 适用于原油船货油舱 3. 常以酚醛树脂改性 4.、4.、5. 适用于成品油船货油舱
其他涂料		耐热漆、耐酸漆、阻尼涂料、屏蔽涂料等	

此外，根据其基料类型的不同，船舶涂料还划分为常规涂料和高性能涂料两类。以沥青、油脂类、醇酸树脂、酚醛树脂及一些天然树脂为基料的船舶涂料，是早期发展和应用的涂料，称之为常规涂料。而以各种耐水性好、耐化学性好的合成树脂为基料，多数制成厚膜型的船舶涂料，是近年来不断发展和日益广泛获得应用的涂料，称之为高性能涂料。

二、船舶各主要部位对涂料的要求

船舶的各部位处于不同的腐蚀环境之中，亦遭受外界的不同的作用，因此对涂料的性能要求也各不相同。

（一）船底区

船底区长期浸泡于海水之中，受到海水的电化学腐蚀和海水的冲刷作用，当船舶停泊于海港时，还会受到海生物污损的威胁。此外，船舶通常还采用牺牲阳极或外加电流方式进行阴极保护，整个船体水下区域将成为阴极，会因过量的 OH^- 离子呈现碱性。因此，船底区所用的涂料必须具有良好的耐水性、耐碱性、耐磨性，其外层涂料还应具有防止海生物附着的防污性。

（二）水线区

水线区常处于海水浸泡、冲刷以及日光曝晒的干湿交潜状态，即处于飞溅区这一特殊腐蚀环境，因此使用于水线部位的涂料必须有良好的耐水性、耐候性、耐干湿交替性，涂层应具有良好的机械强度、耐摩擦和耐冲击，当船舶采用阴极保护时，还要求涂料有良好的耐碱性。

（三）大气曝露区

船舶的干舷、上层建筑外部、露天甲板与甲板舾装件等处于海洋大气曝露区，这些部位长年累月地处于含盐的潮湿的海洋大气之中，又经常受到日光曝晒，有时还受到海浪冲击，因此要求涂料有优良的防锈性、耐候性、抗冲击与摩擦性能。由于上述部位属于船舶外观上的主要部位，因此其面层涂料还需要早好的保色性和保光性。

（四）液舱

船舶内部的液舱主要有压载水舱、饮水舱、燃油舱、滑油舱和油船的货油舱等。

压载水舱长期处于海水压载和空载的干湿交替状态，环境湿热、盐分高、密不通风、条件相当恶劣，而且维修十分困难，要求涂料有优良的耐水、耐盐雾、耐干湿交替和卓越的抗腐蚀性能。

饮水舱（包括淡水舱）长期存放饮淡水，要求涂料有良好的耐水性。由于饮水直接关系到人体的健康，故饮水舱涂料必须绝对保证不会污染水质，为此必须经有关卫生当局的认可。

燃油舱、滑油舱长期存放燃滑油，一般不易受到腐蚀，故可以不涂装，但在投油封舱以前必须清洁表面，涂以相应的油类保护。为减轻封舱前的表面清理工作，往往在分段阶段燃滑油舱表面经二次除锈以后以石油树脂漆或车间底漆保护。循环滑油舱为确保滑油的品质，常采用环氧树脂类耐油涂料

进行保护。

油船的货油舱一般要经受（装载）油和海水（压载）交替装载，因此保护涂料既要有良好的耐油性，又要有优良的耐水性和耐交替装载的性能。

成品油船货油舱的涂料要求很高，详见本书第十章专题介绍。

（五）机舱、泵舱

机舱、泵舱为船舶主要工作场所，室内温度较一般舱室内部为高。

机、泵舱的舱顶、舱壁涂料要求不易燃烧，且一旦燃烧时也不会放出过量的烟，故选用的品种需要获得船检部门的许可。

机、泵舱底部经常积聚油和水，因此要求涂料有良好的耐油惟和耐水性。

（六）房舱

房舱内装饰一般已不采用涂料，但在绝缘层下和里子板内部仍需涂装防锈涂料。有些土作舱室、贮藏室、卫生处所则需要用涂料保护和装饰。

用于房舱内的涂料应有良好的防锈性能，表面涂料应具良好的装饰性。为了防火安全，涂料应不易燃烧，且一旦燃烧时也不会放出过量的烟，故同样选用的品种需要获得船检部门的许可。

第二节　船舶涂料用主要成膜物质

涂料的性能取决于构成涂料的原材料。而在诸多原材料中，要数主要成膜物质（基料）的影响最大。船舶涂料的性能近些年来之所以获得越来越大的提高，就是由于不断采用了高性能的合成树脂作为基料的缘故。

为了对船舶涂料的性能有比较明确的了解，首先应对船舶涂料用主要成膜物质的性能有一个比较清楚的认识。

一、天然树脂

用于船舶涂料的天然树脂主要是松香和大漆。

（一）松香

松香是从松树皮层分泌出来的松脂中提炼而得的一种天然树脂。松香质硬而脆，主要成分是松香酸，分子式为 $C_{19}H_{29}COOH$，有九种异构体。松香酸是一种不饱和酸，分子内具有羧基和共轭双键。

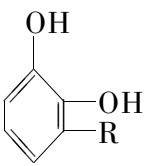
松香可制成松香皂。其中钙皂（石灰松香）可作为制漆的基料。松香与甘油反应获得甘油松香酯，与季戊四醇反应获得季戊四醇松香酯用作酯胶漆的基料。松香还能与酚醛树脂共熔制成松香改性酚醛树脂作为酚醛涂料的基料。

松香在船舶涂料中的最大作用是利用它在海水中的微溶性，帮助毒料从漆膜中向海水渗出。

（二）大漆

大漆又称生漆、天然漆、国漆。是从漆树韧皮层内分泌出来的乳白色粘稠液体，当其接触空气后颜色逐步加深，最后成为黑褐色或黑色。

大漆的主要成分是漆酚。不同产地、不同漆树生产的大漆其漆酚的结构各不相同。漆酚在大漆中含量约 40%～70%，漆酚含量愈高，则质量愈佳。漆酚的结构式如下：



（R 为：$-C_{14}H_{31}$；$-C_{15}H_{29}$；$-C_{15}H_{27}$；$-C_{15}H_{25}$；$-C_{17}H_{33}$；$-C_{17}H_{35}$等）

大漆在空气中能够氧化聚合干燥，但需依靠大漆内部存在的漆酶的作

用。漆酶生长最适宜的条件是在 20～35℃，相对湿度在 80%～90%，在这种条件下大漆固化干燥也最快。

大漆固化后形成网状高分子立体结构，因此其漆膜坚硬而富有光泽，耐磨、耐油、耐酸、耐水、耐溶剂、耐化学介质等性能优良。但大漆易使人体过敏，难以喷涂，使其应用受到限制，因此需加工改性。大漆经脱水、活化漆酚、进行一定程度氧化聚合并经化学改性后用溶剂稀释能获得改性大漆，也称为漆酚树脂改性生漆。改性后大漆对人体无毒无害，且性能上能得到许多改进和提高。尤其是干性有明显提高，可采用高压无气方式进行喷涂，其原有的优良性则能保持，因此是一种性能很好的涂料。改性后的大漆可用作油船的货油舱的保护涂料，也可用作饮淡水舱用保护涂料。

二、油类

油类是涂料工业上使用最早的一种主要成膜物质，主要制造油性漆和油基漆。全部由油料作主要成膜物质的漆为油性漆，含有一部分油料的漆为油基漆。

植物油主要成分为甘油三脂肪酸酯，其分子式可简单表示为：

$$\begin{array}{l} CH_2\text{—}OOCR \\ | \\ CH\text{—}OOCR \\ | \\ CH_2\text{—}OOCR \end{array}$$

其中 R 最低为 C_5H_{11}—，最高为 $C_{23}H_{47}$—，R 的结构对油类的性能有很大影响。

脂肪酸可以分为饱和的和不饱和的两类。不饱和脂肪酸分子内具有双键，双键能发生氧化聚合反应，使油类发生固化。脂肪酸分子内的双键越多，油类的干性就越好。油性漆或油基漆在空气中的干燥主要是依靠双键的氧化聚合。

由于油类分子是酯类结构，因此具有如下两方面性质。

（1）在酸、碱存在下，油类会水解成脂肪酸与甘油，与碱类能皂解生成脂肪酸盐（皂）。因此，油性漆和油基漆不耐酸和碱。

（2）在碱性催化剂存在下，油类能与多元醇反应，进行醇解，使多元醇与脂肪酸重新组合，这是制造醇酸树脂的主要反应。从油到醇酸树脂，性能将获得很大提高。

涂料工业中常用的油类有桐油、梓油、亚麻油等干性油；豆油、葵花油、棉籽油等半干性油和蓖麻油、椰子油等不干性油。半干性油和不干性油主要用宋生产醇酸树脂。

三、醇酸树脂

醇酸树脂是指由多元醇、多元酸与脂肪酸制成的一种聚酯，它不同于单纯由多元醇与多元酸制成的聚酯树脂。制备醇酸树脂用的脂肪酸的来源是油料。

制造醇酸树脂的多元醇常采用甘油（丙三醇）和季戊四醇；多元酸大多采用苯二甲酸酐；油料有干性油、半干性油和不干性油。

用干性油、半干性油制造的醇酸树脂统称干性油醇酸树脂，能在常温下自行干燥，可以作为涂料的主要成膜物质。用不干性油制造的醇酸树脂称为不干性油醇酸树脂，不能在常温下自行干燥，故不能单独作为涂料的主要成膜物质，需与其他树脂合用。如与硝酸纤维素、氯化橡胶等合用可增加漆膜的光泽、附着力、并起着增塑与提高耐候性作用，与氨基树脂合用能缩聚而固化。

醇酸树脂涂料较油性漆的干燥性能好得多。因为它的多元醇的苯二甲酸酯上的很多不饱和脂肪酸基能在空气中氧化聚合。因此，半干性油制成的醇酸树脂也能在空气中固化。另外由于醇酸树脂分子比油类分子大得多。稍经聚合就能固化，而油类却须多次聚合才能形成大分子而固化。

醇酸树脂分子中含有残留的羟基和羧基，这些极性基团使漆膜具有比油性漆更好的附着力。

此外，醇酸树脂在光泽、硬度、保光性、耐候性等方面都比油性漆强得多。

醇酸树脂漆的性能还与脂肪酸含量（油度）有很大关系。通常将含油35%～45%的树脂称为短油度醇酸树脂，含油45%～60%的树脂称为中油

度醇酸树脂，含油 60% ~ 70%的树脂称为长油度醇酸树脂。醇酸树脂的油度与性能的关系见表 1 – 7 – 2 所示。

表 1 – 7 – 2　油度对醇酸树脂性能的影响

性质	油度，%
	40　50　60　70
溶剂	芳烃溶剂—混合溶剂—脂肪烃溶剂
硬度（烘）	←
干率（常温）	→　←
户外耐久性	→　←
耐水性	→　←
贮存性	→
流平性	→
原始光泽	←
保光性	←
保色性	←

注：表中箭头表示性能改进的趋势，

醇酸树脂由于以聚酯结构为主键，因此耐酸、碱性能较差，结构中还残留有未反应的羟基、羧基，所以耐水性亦较差，在船舶涂料中不适宜用作水线以下的涂料。

醇酸树脂可以用许多树脂来改性，改性后的醇酸树脂可增加不少优点，亦会带来一定的缺点。醇酸树脂改性的效果见表 1 – 7 – 3 所示。

表 1 – 7 – 3　醇酸树脂改性效果

改性剂	优点	缺点
松香与松香酯	快干、易刷涂，增加硬度，增加附着力	用量过多时易变黄，耐候性下降
酚醛树脂	增加硬度，增加耐水性、耐碱性、耐溶剂性	变黄性大，稳定性差

改性剂	优点	缺点
乙烯单体（苯乙烯、甲基丙烯酸酯）	快干，增加光泽、颜色，提高耐候性（甲基丙烯酸酯改性），提高耐水性（苯乙烯改性）	耐溶剂性差、耐候性降低（苯乙烯改性）
有机硅（少量）	提高防潮性，提高耐候性	降低耐溶剂性，改性剂过多干燥困难
苯甲酸、对叔基苯甲酸	调整醇酸树脂的官能度，增加硬度，快干，改进颜色、光泽、耐化学药品性	溶解度、柔韧性降低
环氧树脂	提高附着力、耐碱性、耐溶剂性	易变色、易粉化
异氰酸酯	提高耐水性，快干，提高附着力、抗磨性	变黄、粉化（芳族异氰酸酯）

四、酚醛树脂

酚醛树脂是酚与醛在催化剂存在下缩合生产的产物。由于使用原料的区别，催化剂的种类以及反应条件的不同，可获得一系列性能各异的树脂。

船舶涂料中应用的酚醛树脂多为油溶性酚醛树脂，有松香改性酚醛树脂和纯酚醛树脂，尤以后者应用最多。

松香改性酚醛树脂是将酚与醛在碱性催化剂存在下生成的可溶性酚醛树脂，再与松香反应经甘油酯化而制得。

纯酚醛树脂是用芳基或三碳以上烷基取代酚的苯环上的氢（如苯基苯酚、对叔丁基酚）与甲醛反应而制成油溶性树脂。

纯酚醛树脂硬而脆，须与于性油一起熬炼、改性才能作为涂料的基料。故纯酚醛树脂涂料亦属于油基漆。

纯酚醛树脂的干性、硬度、耐化学药品性、耐水性等方甲都优于松香改性酚醛树脂。纯酚醛树脂可改性醇酸树脂、环氧树脂，能进一步提高它们的耐水性。

纯酚醛树脂常用来制备船舶的水线漆和甲板漆以及一部分船用防锈漆。

但由于含有一定的油料，故不适宜制备水线以下的船舶涂料。

五、沥青

沥青在涂料工业中的应用已有非常悠久的历史。沥青通常为黑色硬质可塑性物质，或呈无定形的粘稠状物质，其成分十分复杂，大多为芳香烃类的聚合物。沥青根据来源不同主要有以下三个品种。

（1）天然沥青：亦叫地沥青，由沥青矿采掘得到，或从沥青岩石中用溶剂或蒸汽抽提获得。

（2）石油沥青：由石油裂解、分馏提取各种产品后的最后剩余物，或再经加工处理而获得。

（3）煤焦沥青：由煤干馏中获得的焦油、经过蒸馏后的最后剩余物。

上述三种沥青在涂料工业中都经常使用，而用来制备船舶涂料的沥青主要是煤焦沥青。

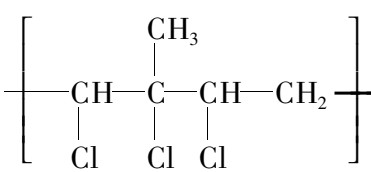
煤焦沥青比天然沥青和石油沥青有更好的抗水、抗化学药品性，对钢材附着力强，因此在船舶涂料中常用来制备水线以下和压载水舱用的涂料。但煤焦沥青耐热性差、不耐干湿交替和大气曝晒，因此不适合制备水线以上的船舶涂料。

煤焦沥青还有很强的渗色性，因此煤焦沥青类涂料一般不与其他类型涂料配套应用。

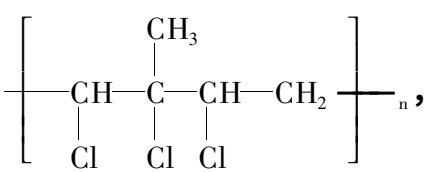
近年来的研究表明，煤焦沥青中含有较强的致癌物质，因此尽管其性能良好、价格低廉仍有被淘汰的可能。

六、氯化橡胶

氯化橡胶系天然橡胶或合成橡胶经氯化反应而获得。是三氯橡胶



，和四氯橡胶



，

的混合物，含氯量一般在 65% ~ 68%，通常可用 $(C_{10}H_{13}Cl_7)_n$ 的分子式表示。

氯化橡胶系白色粉状或细片状松软固体，能溶于芳香族烃、氯化烃、酯类与高级酮类溶剂。当溶剂挥发后，便能干燥成膜，但性脆而附着力差，因此制备氯化橡胶涂料必须添加增塑剂。常用的增塑剂为氯化石蜡、苯二甲酸二了酯、苯二甲酸二辛酯、磷酸：甲酚酯、环氧化豆油等。其中以氯化石蜡应用最多。氯化橡胶为基料的涂料具有以下突出的优点。

（1）漆膜的水蒸气渗透性和氧气渗透性远远低于醇酸树脂（约为醇酸树脂的 1/10），因此具有优良的耐水性和防锈性。

（2）氯化橡胶在化学上呈惰性，因此具有优良的耐酸性和耐碱性。

（3）氯化橡胶涂料在许多物质表面有良好附着力，层间附着力很好，甚至使用多年的旧涂层上覆盖新的涂层时亦能有良好的附着力。

（4）干燥快，可在低温条件下施工。

（5）涂层干燥后不燃。

（6）能与其他多种树脂互溶，以改进涂层的性能。

鉴于氯化橡胶涂料上述突出的优点，在船舶上获得日益广泛的应用，不仅用作水线以上的涂料，也大量应用于水线以下的涂料。

氯化橡胶涂料的缺点是在高温下会释放出氯化氢（HCl）气体，对人体有很大的刺激作用，因此不适合作为机、泵舱和房舱内的涂料。此外，涂有氯化橡胶涂料的钢板，经电焊和火工校正后，氯离子易深入钢铁内部，造成较严重的腐蚀。

氯化橡胶在生产过程中采用四氯化碳为溶剂，其副产品为氯化氢，生产中排放的废水和废气中少不了上述物质，因此对环境污染的问题较为突出，在许多国家中氯化橡胶的生产受到限制。氯化橡胶将面临逐步被淘汰的可能。

七、乙烯类树脂

乙烯类树脂是由乙烯及其衍生物聚合获得的一系列树脂的总称。用于涂料工业的乙烯类树脂有许多，如聚醋酸乙烯树脂、氯乙烯醋酸乙烯共聚树脂

（简称氯醋共聚树脂）、聚乙烯醇缩醛树脂、聚二乙烯基乙炔树脂、氯乙烯偏氯乙烯共聚树脂（简称氯偏共聚树脂）等等。而在船舶涂料中最重要的是氯醋三元共聚树脂和聚乙烯醇缩丁醛树脂。

（一）氯醋三元共聚树脂

氯醋三元共聚树脂是在氯乙烯、醋酸乙烯共聚时引进含羟基或含羧基的物质进行共聚的改性氯醋共聚树脂。在船舶涂料中，氯醋三元共聚树脂通常由氯乙烯、醋酸乙烯和顺丁烯二酸酐以一定的比例共聚获得，为白色或微黄色粉末或细粒状的固体。其溶剂为酮类、酯类、氯代烃、硝基烷烃等。

氯醋三元共聚树脂作为涂料的主要成膜物质时需增添增塑剂（如磷酸三甲酚酯、苯二甲酸二丁酯、氯化石蜡等），以改进其韧性，并应增添稳定剂（如低分子环氧、环氧化豆油、月桂酸锡等），以免其分解逸出氯化氢。

氯醋三元共聚树脂制成的涂料具有优良的耐水性、耐碱性、耐油性，其耐电位性可与环氧或环氧沥青涂料相当。在船舶涂料中常用来制备水线以下涂料（船底防锈漆与防污漆）。

氯醋三元共聚树脂涂料的干燥性很快，即使在 $-10℃$的气温条件下也能施工、干燥，获得防锈性能优良的涂层。

但氯醋三元共聚树脂由于溶解度有限，因而涂料固体分含量较低，致使每道涂层膜较薄，为确保一定的干膜厚度需反复多次涂装，造成施工麻烦。其另一个缺点是对钢材表面处理要求较高，需要喷砂处理，尽管如此，其附着力仍不理想，需要用其他树脂进一步改性（如沥青、环氧树脂、酚醛树脂等）。

（二）聚乙烯醇缩丁醛树脂

聚乙烯醇缩丁醛树脂由聚乙烯醇在水、醇或酸介质中与丁醛缩合而制得的白色絮状固体。溶于醇类，在乙醇中溶解度约 10%，溶液为淡黄色透明树脂液。

聚乙烯醇缩丁醛树脂作为涂料的主要成膜物质，具有附着力强、机械强

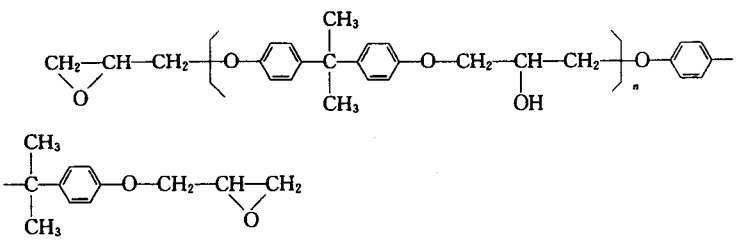
度好、耐油性好等优点。尤其是干燥迅速、带漆焊接不会影响焊接质量、被最早作为车间底漆的基料在船舶涂料中获得应用。

聚乙烯醇缩丁醛树脂配以四碱式锌黄与磷酸能制成磷化底漆。磷化底漆有极强的附着力和一定的防锈能力，不仅可以作为钢铁的底层涂料，亦可用于锌、铅等有色金属表面，以增强其他涂料对底材的附着力。

但聚乙烯醇缩丁醛的溶解度有限，因而制成的涂料固体分含量较低，一次成膜厚度低（一般为 5 ~ 15μm），故不能制成一般的防锈涂料。其另一个缺点是耐水性和耐碱性较差，因此需用酚醛树脂改性，以提高其性能，如作为车间底漆，则在船体水线以下部位涂装前应彻底去除干净。

八、环氧树脂

环氧树脂是含有环氧基团（—CH—CH— ）的高分子物质，主要是由环氧氯丙烷和双酚 A 合成的，其分子结构通式为：



环氧树脂是线型分子结构，结构式中 n 表示聚合度，n 值越大，分子链越长，分子量也越大，羟基含量也越多。n 通常在 0 ~ 14 之间，分子量约在 350 ~ 4000 之间。

环氧树脂结构中含有的羟基和环氧基，可以与其他合成树脂或化合物发生反应。如酚醛树脂、氨基树脂、聚酰胺树脂、多异氰酸酯等。因此，环氧树脂可以用许多树脂进行改性，亦可与许多树脂进行交联固化，获得各种不同性能的环氧树脂涂料，

在常温下环氧树脂可以用多元胺或聚酰胺进行固化，也司用多异氰酸酯固化。大多数的环氧类船舶涂料采用聚酰胺树脂固化。

环氧树脂的分子结构决定了环氧系涂料具有优异的耐碱性、抗化学物质

性，有很强的粘结力，因而涂料的附着力强，成膜后涂层的机械强度高且富有韧性。环氧树脂分子中苯核上羟基已被醚化，故性质稳定。但分子中尚有许多羟基，因此耐水性稍差。

环氧树脂涂料另外的缺点是户外耐候性差，漆膜易粉化、失光，不宜作室外装饰性涂层。

环氧树脂涂料多是双组分，使用有所不便，在低温时固化速度很慢，低于 5℃时固化反应几乎停止。此外，涂层与涂层之间的涂装间隔时间有一定的限制，超过规定的最长涂装间隔时间后，前涂层充分固化，层与层之间会互不相容，使后涂层难以紧密附着，必须对前涂层作较彻底的打毛处理才行。

环氧树脂涂料在船舶上日益广泛地获得应用，应用最多的在水线以下和液舱内。

用煤焦沥青对环氧树脂涂料加以改性，既可保持环氧涂料的优点，又可提高其耐水性和降低涂料的成本。环氧沥青涂料已广泛用于船底防锈漆和压载水舱保护方面。

环氧涂料中加入足够量的锌粉，制成环氧富锌涂料，可用作高性能的防锈涂料，也可制成车间底漆。

环氧涂料中加入一定量的氧化铁红，制成环氧铁红底漆，也是车间底漆中的一个重要品种。

纯环氧树脂涂料可作为饮水舱漆，不会污染水质。

纯环氧树脂涂料和酚醛改性环氧树脂涂料有优异的抗化学药品性和抗溶剂性，是成品油船货油舱涂料中两个重要的品种。

环氧树脂还能与干性油反应，使环氧基和羟基与脂肪酸的羧基反应而酯化，酯化了的环氧树脂可不再用其他固化剂，而在常温下自行固化。用环氧酯作为主要成膜物质的涂料，其性能低于双组分环氧树脂涂料，但施工就方便得多。在船舶涂料中，环氧酯常用作船用防锈漆的基料。

九、聚氨酯树脂

聚氨酯树脂是聚氨基甲酸酯树脂的简称，它并非由氨基甲酸酯聚合而

成，而是指其成分中含有相当数量的氨酯键（）的一类树脂。聚氨酯树脂与其他树脂有以下不同。

（1）聚氨酯树脂中除了氨酯键外，尚有许多其他酯键、醚键、脲键或不饱和双键，而不象聚酯树脂只有酯键，聚醚中只含醚键。

（2）聚氨酯树脂不象聚氯乙烯树脂由氯乙烯单体聚合、丙烯酸酯树脂由丙烯酸单体聚合，它不能由氨基甲酸酯单体聚合，而是由多异氰酸酯与多元醇加成聚合而获得。因此，聚氨酯树脂实质上应称为多异氰酸、多元醇共聚树脂。

（3）聚氨酯树脂在加成聚合的过程中没有任何副产物生成，因此固化后体积收缩很小。而不少树脂在聚合时会产生水或其他副产品。

聚氨酯树脂于本世纪 40 年代问世，半个世纪中发展很快，在涂料、粘合剂，泡沫塑料、橡胶、纺织、皮革等行业获得越来越广的应用。

聚氨酯树脂用作涂料的基料制成的聚氨酯涂料有许多突出的优点。

（1）漆膜耐磨性特别强，在各类涂料品种中最为突出。

（2）聚氨酯涂料不仅有优异的保护功能，：并兼具美观方面的装饰性。

（3）漆膜附着力强，对各种金属，非金属表面均有优异的附着力。

（4）漆膜的弹性可根据需要而调节其成分配比，可以从极坚硬调节到极柔韧的弹性涂层。

（5）漆膜具有较全面的耐化学药品性，耐酸、碱、盐和石油化学产品。

（6）能够低温固化。一般双组分涂料如环氧、聚酯涂料在 10℃以下固化就很慢，而聚氨酯涂料即使在 0～－10℃的情况下也能正常固化。

但是聚氨酯涂料价格较贵，树脂中游离的异氰酸酯对人体毒性较大，且异氰酸基很活泼，遇水要凝胶，故施工时对物面和环境湿度控制要求高，涂装间隔限制较严，稍不慎会产生起泡和层间剥离的弊病。用于聚氨酯涂料的溶剂比较严格，一般要求氨酯级溶剂，应不含任何带有羟基的物质，因此一般用于环氧涂料的稀释剂（往往含有少量的醇类物质）不可随意用于聚氨酯涂料的稀释。

与环氧树脂涂料相似，聚氨酯涂料的涂层与涂层之间的涂装间隔时间也有一定的限制，超过规定的最长涂装间隔时间后，必须对前涂层作较彻底的

打毛处理。

此外，聚氨酯涂料的溶剂为酮类或酯类，闪点很低，挥发性很强，稍不注意会引起燃爆事故，需要有严格的安全措施。

在船舶涂料中，聚氨酯涂料常用来改性环氧沥青涂料，使之具有低温固化的性能，以利于冬季施工。采用环氧或改性环氧系统涂装的船体水线以上曝露区域，如水线、干舷、上层建筑外部，为提高其装饰性能和保色性能，常最后采用脂肪族聚氨酯涂料作为面层涂料。而在船舶涂料中最重要的用途在于利用聚氨酯涂料有很强的耐溶剂性和耐化学药品性，用作为成品油船的货油舱涂料。

十、无机硅酸锌涂料

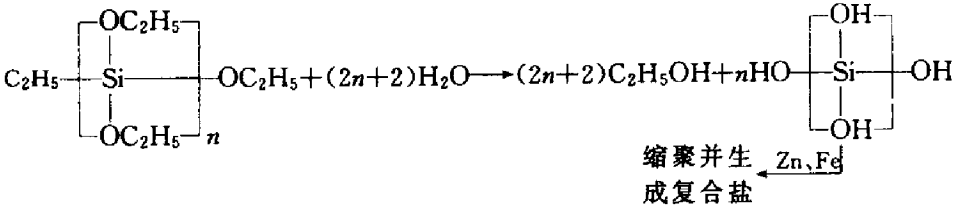
无机硅酸锌不是指一种涂料的基料（主要成膜物质），而是指一类涂料，一种双组分化学固化型涂料。无机硅酸锌涂料根据所采用的基料和固化机理不同，大致分为三种类型。

一种是以硅酸钠或硅酸钾为基料，配合以锌粉及其他颜料组成的水溶性后固型涂料。这种涂料表面处理要求高（通常需要 Sa3 级），涂装后需再涂固化液使其固化成膜，然后还要用水洗去表面的水溶性盐类。施工较为麻烦。

另一种是以硅酸锂为基料，配合以锌粉及其他颜料组成的水溶性自固型涂料。这种涂料涂装后能自行固化，施工不如水溶性后固型涂料复杂，但表面处理要求同样很高，通常亦需要达到 Sa3 级。

第三种是醇溶性自固性涂料，以正硅酸乙酯为基料，配以锌粉、着色颜料、助剂、溶剂等组成，一般分为两罐装。这种醇溶性自固型无机硅酸锌涂料在船舶涂装中应用较多，大量的是用作车间底漆，也有不少是用于需要重点防腐蚀的部位（如甲板、上层建筑外部等）。

醇溶性自固型无机硅酸锌涂料的成膜机理是依靠正硅酸乙酯吸收空气中的水分、发生水解反应，自身产生缩聚、并同时与锌及钢铁反应生成复合盐类，故干燥的同时通过化学反应与钢材表面牢固结合。其反应机理大致如下：



醇溶性自固型无机硅酸锌涂料比水溶性无机硅酸锌涂料施工略为简单，其表面处理仍需要喷射磨料处理，但一般只要求达到 Sa2.5 级就能满足要求。

无机硅酸锌涂料（水溶性或醇溶性）有很优异的防锈性能，这是因为：

涂层中大量的锌粉粒子之间，锌粉粒子与钢铁表面之间紧密接触，起到牺牲阳极保护的作用。

一旦锌粉与空气中的 CO_2、SO_2、或盐分中的 Cl^- 接触生成锌的各种盐类、均为难溶的碱式盐，会填没涂层中的空隙，而保护下层的锌粉粒子难以进一步作用，进而保护钢材表面。

无机硅酸锌涂层不如有机涂层那样受紫外线照射后容易老化。

所以无机硅酸锌涂料是一种性能极为优异的防锈涂料。

用作车间底漆的醇溶性自固型无机硅酸锌涂料通常只需涂装 15μm 厚度就具有室外曝露达 6～9 个月的防锈能力。

用作重点部位防锈用的无机硅酸锌涂料（各种类型）涂装 75～150μm 的话可具备数年至十多年甚至 20 年的室外防锈能力。

无机硅酸锌涂料有极好的耐化学溶剂性，因此在成品油船货油舱的涂装中，常用于装载中性的强溶剂液货舱之中。

无机硅酸锌涂料施工后，如需再提高其防锈性能或提高其表面装饰性能，应采用环氧涂料对其表面进行封闭（一般将环氧涂料作适当稀释后喷涂），然后再涂装其他表面涂料。油性涂料和油基涂料不能直接涂于无机硅酸锌涂料的表面，因为锌的氧化物会皂化油类、引起涂层剥离。

无机硅酸锌涂料施工时必须注意以下几点：

（1）表面处理必须是喷射磨料处理，以确保达到一定的清洁度和表面粗糙度；

（2）涂装前钢材表面需确保无油、水和其他杂质，当然该涂料不能施工

于任何有涂料的表面；

（3）施工厚度应严格按制造厂提供的要求施工，过厚涂装将会发生龟裂，导致前功尽弃。

十一、环氧沥青和漂白环氧沥青涂料

环氧沥青涂料也称为焦油环氧涂料（coal tar epoxy），它是采用煤焦沥青改性的环氧类涂料。

用煤焦沥青对环氧树脂涂料进行改性，可提高环氧树脂涂料的耐水性，又可降低涂料的成本。因此船舶涂料中用于船体水线以下的防锈涂料和用于防止压载水舱腐蚀的涂料都不直接采取环氧树脂涂料而是采用环氧沥青涂料。

环氧沥青涂料与环氧树脂涂料相比还有一个优点是附着力更强，因此对钢材表面处理的要求就不如环氧树脂涂料那样严格，采用动力工具打磨达到St 3级就可符合要求。

与通常的环氧树脂涂料一样，环氧沥青涂料也有一个涂装间隔时间的问题。超过最长涂装间隔时间后，其表面也要作打毛处理，否则层间附着力会有问题。

环氧沥青涂料的主要缺点有以下几个。

（1）沥青色泽深、不能制成浅色的涂料。

（2）沥青的渗色性很强，在环氧沥青表面不能涂装其他浅色涂料，如若涂装则底层的沥青很难避免其渗透到表面来，引起面层浅色涂料的变色。

（3）近年来研究表明煤焦沥青含有较强的致癌物质，这将对馀料制造和涂料施工人员的健康有害。因此，国际上已逐步以其他树脂来代替环氧沥青中的沥青成分，发展出漂白环氧沥青的新品种涂料。

漂白环氧沥青涂料亦称作漂白焦油环氧涂料（bleached tarepoxy paint）或抗渗色环氧沥青涂料（non bleed tar epoxypaint）。

漂白环氧沥青涂料并非是将环氧沥青涂料中的沥青进行“漂白”处理而成，而是采用其他颜色较浅、不会渗色、性能又接近沥青的树脂来取代沥青制成。

通常取代沥青的树脂为氧茚－茚树脂，俗称古马隆树脂，也叫苯骈呋喃树脂。它是由焦油蒸馏过程中得到的沸程在160～200℃的馏分（主要成分为氧茚和茚），在催化剂（硫酸或三氯化铝或三氟化硼等）存在下聚合所得的树脂。

氧茚－茚树脂具有良好的耐水性、绝缘性和耐酸碱性，用它代替环氧沥青涂料中煤焦沥青成分，可保持环氧沥青涂料优异的耐水性，又可制成环氧沥青涂料所不能制备的浅色涂料。

用氧茚－茚树脂代替煤焦沥青制成的漂白环氧沥青涂料，在船舶涂装保护中愈来愈受到青睐。最初它用于机舱底部，是由于它具有良好的耐水、耐油性和浅色。也用于一些散货船的货舱和货/压载舱。近年来不少船舶的室外曝露部位都采用漂白焦油环氧涂料，是因为它施工较为简便，而价格也低于一般的环氧树脂涂料。

值得注意的是许多国家对涂料中使用煤焦沥青已有限制，因此许多船东要求压载水舱保护涂料以漂白环氧沥青涂料代替传统的环氧沥青涂料，这不仅是为了避免煤焦沥青对人体的危害，而且由于舱内能做成明亮的浅色，对涂层质量检查（容易发现涂层缺陷）和质量保证，以及对进出舱人员的安全均有好处。

漂白环氧沥青涂料与通常的环氧沥青涂料相似，同属于化学反应固化型涂料，因此环境温度对固化反应速度影响较大，低温时固化缓慢，涂层与涂层之间的涂装间隔时间亦受到一定的限制。经过各国涂料研究人员的努力，目前不少涂料厂商已具有无涂装间隔时间限制的漂白焦油环氧涂料，这给造船涂装带来了很大的方便。正因为如此，漂白环氧沥青涂料被越来越广泛地应用于新建造的船舶之中。

十二、丙烯酸树脂

丙烯酸树脂通常以丙烯酸酯或/和甲基丙烯酸酯，以及苯乙烯为主的乙烯系单体共聚而成。

丙烯酸树脂可单独作为主要成膜物质制成各种各样的涂料，也可用来改性醇酸树脂、氨基树脂、氯化橡胶树脂、聚氨酯树脂、环氧树脂、乙烯类树脂等，构成许许多多类型的新型涂料。

丙烯酸树脂涂料按照不同的分类标准，可划分成不同的系列。若按固化方式可分为自干型和烘干型丙烯酸树脂涂料：若按其受热后所发生的变化状态，可分为热塑性和热固性丙烯酸树脂涂料；若按固化成膜机理可分为热塑性和热固性（也称交联型）丙烯酸树脂涂料；若按其形态可分为溶剂型、水溶型、乳液、粉末丙烯酸树脂涂料等。

以丙烯酸树脂为基料的涂料具有优异的保色、保光性能，而且其膜光亮丰满、耐热、耐腐蚀，是近 30 年中逐步发展起来的一类高性能涂料。特别是由于其树脂色泽水白、呈中性，特别适合制造高档的透明度及白度极好的清漆和色漆。

丙烯酸树脂涂料用溶剂法制造的缺点在于树脂中的游离单体不易除尽，造成施工时气味大，有较强的刺激性。大多数的制备丙烯酸树脂用的各种丙烯酸酯均有一定程度的毒性，对施工人员的健康有一定的危害，这一方面要求涂料制造厂商应尽可能降低树脂中的游离单体的含量，近几年来运用悬浮法制备的热塑性固体丙烯酸树脂，几乎不含游离单体，因此制备涂料有利于改善劳动保护。另一方面则要求涂料施工时应充分做好人员的个体劳动保护和环境的卫生保护。

丙烯酸树脂涂料由于其优异的性能已经在轿车、飞机、机床、桥梁、家用电器、仪表设备及各种轻工产品中获得广泛应用。但在船舶上以前的应用量有限，只用于少数外观装饰要苎高的船舶的上层建筑外表面和干舷区域，采用的品种则为溶剂型、白干型热塑性涂料。但由于近些年来氯化橡胶生产受到一定的限制后，丙烯酸树脂涂料因其在施工中具备像氯化橡胶涂料一样的快干、无涂装间隔时间限制等优点，便逐步在船舶的水线以上室外曝露区域获得较多的应用，已局部取代氯化橡胶涂料。

水溶性丙烯酸涂料施工中安全性好，可用作船舶舱室内装饰，但目前应用还不广泛。

第三节　车间底漆

车间底漆，又称为保养底漆或预处理底漆，是钢板或型钢经抛丸预处理

除锈后在流水线上采取的一种底漆。车间底漆的作用是对经过抛丸处理的钢材表面进行保护，防止钢材在加工、组装到分段形成甚至到船台合拢期间产生锈蚀，从而大大减轻分段或船台涂装时的除锈工作量。

与通常的涂层不同，车间底漆有以下几个特点。

（1）车间底漆是一种临时保养性的底漆，在分段正式涂装时它可以除去，也可以保留，主要取决于正式涂装时车间底漆涂层本身的完好性和第一层涂装的涂料对表面处理的具体要求。为此，车间底漆的膜厚将不计入船体涂层的总膜厚之内。

（2）钢材涂有车间底漆以后，在焊接、切割时，该底漆可不必除去。

（3）由于正式涂装时车间底漆可以保留，故车间底漆要能与各种船舶涂料配套应用。

（4）车间底漆的喷涂是在自动化流水线上进行的。

由于施工上的这些特点，决定了车间底漆应具备与一般涂料所不同的性能。

一、车间底漆的性能

作为造船钢材预处理用的车间底漆，必须具备以下性能。

车间底漆的存在应对焊接与切割无不良影响。带漆钢材焊接时，焊缝的表面和内在质量应不受影响，焊缝的机械强度亦不应受到影响。带漆钢材切割时，切割速度不应受到明显影响，切割边缘亦应像无漆钢材一样比较平滑光洁。为此车间底漆选用的品种应获得船舶检验机构（船舶检验局或船级社）的认可。

（2）具有快干性，常温下（摄氏 23℃）能在 5 分钟内干燥，以适合自动化流水线连续生产。

（3）漆膜应具有较强的耐溶剂性能，能适应涂覆各种类型的防锈漆（底漆）。因此，车间底漆多为化学固化型涂料。

（40 单层漆膜（厚度 15 ~ 25μm）在船舶建造期间处于海洋大气或工业大气中，对钢材至少应有 3 个月以上的防锈能力。

（5）具有良好的耐热性，在焊接、切割、火工校正时漆膜受热破坏的面

积（热影响区）较小。

（6）有良好的耐冲击性和韧性，以适合带漆钢材的机械加工。

（7）具有低毒性，尤其是漆膜受热分解时不应产生过多的有毒气体，即使产生部分有毒有害气体，则其在工人操作时的呼吸带的浓度应低于国家卫生标准规定的范围。

（8）漆膜有较好的耐电位性，以适合船舶的阴极保护。

关于车间底漆的技术指标，GB 6747—86 作出了如下规定：

项目	指标
干燥时间［25℃±1℃表于（指触法）］，min	5
附着力，级	2
漆膜厚度，μm	
含锌粉的车间底漆	15～20
不含锌粉的车间底漆	2025
耐候性（在海洋性气候中生锈），级	
含锌粉的车间底漆（6 个月）	3
不含锌粉的车间底漆（3 个月）	4①
焊接与切割②	1
成型和弯曲③	7

①耐候性指标中的 4 级是指出现锈点的面积不超过 50%。

②为保证项目。

③为保证项目。

二、车间底漆的品种及特点

车间底漆的诞生始于本世纪 50 年代初。最初开发的品种是以聚乙烯醇缩丁醛为基料的磷化底漆，国外也称为洗涤底漆（wash primer）或蚀刻底漆（etch primer）。

磷化底漆对于钢材的焊接、切割无任何不良影响，干性快，其表面能涂

覆各种有机型涂料，价格也较低廉，在 50 年代获得广泛应用，至今国外仍有、些船厂在继续沿用。但该漆在室外保养期较短（一般为三个月），热加工时损伤面积较大，耐电位性能较差，不适合装有阴极保护系统的船体水下部位，故应用受到一定的限制。

为了弥补磷化底漆的不足，60 年代初开发了环氧富锌底漆（zinc rich epoxy primer）。环氧富锌底漆以环氧树脂为基料，聚酰胺树脂为固化剂，金属锌粉为主要防锈颜料。通常干漆膜中锌粉含量在 87% ~ 92%。由于锌粉颗粒相互接触，能起到类似镀锌层的电化学保护作用，因此环氧富锌底漆具有很好的防锈性能，其室外保养期有 6 ~ 9 个月。此外，该漆耐热性较好，热加工时损伤面较小。但环氧富锌底漆由于锌粉含量多，电焊、切割等热加工时，释放较多的氧化锌烟尘，对人体健康带来影响，易导致“锌热病”，且对切割速度和质量亦有一定影响。环氧富锌漆另一缺点是在其表面不能涂覆常规的油性漆和油基漆，尤其是船体水下部位，会导致漆基中油料的皂化，使涂层起泡、剥离。

60 年代中期，为克服环氧富锌的弊端，开发了环氧无锌底漆（non zinc epoxy primer），也称为环氧铁红底漆（iron oxideepoxy primer）。

环氧铁红车间底漆以环氧树脂为基料，聚酰胺树脂为固化剂，氧化铁红为主要防锈颜料。由于不含锌，热加工时无氧化锌烟尘产生。对面漆也无选择性，并且具有良好的耐溶剂性和化学稳定性，特别适合作为装载石油制品的运输船（成品油船）的货油舱部位钢材的预处理底漆。

该漆防锈性能低于环氧富锌漆而略高于磷化底漆，室外保养期约四个月左右。其另一个缺点是干性稍差，抛丸预处理流水线必须安装烘干设备。

70 年代初出现了无机锌底漆（inorganic zinc primer），亦称硅酸锌底漆（zinc silicate primer）或无机硅酸锌底漆。

无机锌底漆用作车间底漆的多是醇溶性自固型。其以硅酸乙酯为基料，锌粉为主要防锈颜料，依靠吸收空气中的水分水解缩聚、并与锌、铁反应形成硅酸锌、铁复合盐类而紧密附着于钢铁表面。

无机锌底漆作为车间底漆有许多突出的优点，不仅有优良的防锈性，室外保养期可达 6 ~ 9 个月，而且干性快、机械性能好、耐热性能优异、热加工损伤面积小、耐溶剂性能强，是目前应用较广的一种车间底漆。但其焊

接、切割时仍有一定量的氧化锌烟尘发生（比环氧富锌底漆则少很多），还需加强个体劳动保护。

上述四种车间底漆是迄今为止国内外车间底漆的主要品种，这些车间底漆主要的性能特点详见表 1－7－4。

表 1－7－4　各种车间底漆性能比较

底漆名称		磷化底漆	环氧富锌底漆	环氧无锌底漆	无机锌底漆
主成分		铬酸锌、聚乙烯醇缩丁醛、酚醛树脂	锌粉、环氧树脂、聚酰胺树脂	氧化铁红、环氧树脂、聚酰胺树脂	锌粉、正硅酸乙酯
标准膜厚，μm		13～15	15～20	20～25	15～20
室外防蚀期，月		3～4	6～9	4	6～9
干燥性能（25℃）		一般，≤5min	一般，≤5min	一般，≤5min	快，1～2min
可焊性		优	一般	良	优
可割性		优	一般	优	良
环境污染性		小	ZnO 浓度较大，易超标准	小	产生一定量 ZnO，通常不超过标准
耐热性		差	良	一般	优
耐电位性		差	优	良	优
施工性能		优	一般	良	一般
耐溶剂性		一般	良	良	优
与防锈涂料的配套性	油性类	优	差	良	差
	沥青类	良	优	良	一般
	氯化橡胶类	良	优	良	良
	乙烯类	优	良	良	良
	环氧沥青类	一般	优	良	优
	纯环氧类	一般	优	良	优
	聚氨酯类	优	一般	良	良

除了上述四种车间底漆以外，80 年代末、90 年代初，国外推出了新一代的耐高温的无机锌车间底漆。这种新型的无机锌底漆在原有的无机锌车间底漆的基础上，采用超耐热树脂对硅酸乙酯进行改性，采用一部分耐热防锈颜料与锌粉共用，旨在降低车间底漆中锌粉含量和提高其耐热性。

耐高温无机锌车间底漆比传统型无机锌车间底漆耐热性能大大提高，从能耐 400℃高温提高到能耐 800℃的高温，这样在电焊和火工校正部位涂层烧损的面积将大大减少。另外含锌量降低不仅降低了热加工区氧化锌烟尘产生的量，于工人健康有利、同时也降低了经过一段时间室外暴露后车间底漆表面白色锌盐的发生量。烧损面的减小和锌盐的减少则可大大降低二次除锈的工作量。这对于劳动力缺乏和劳动力价格昂贵的某些造船国家来说具有积极的意义。目前这种耐高温无机锌车间底漆虽然其价格比传统型无机锌车间底漆高约 30%，但在某些国家（如日本、韩国）已在逐步扩大应用。

三、车间底漆的应用

新造船舶的钢材（板材和型材）除少量薄板（<4mm）和小型型材外，在落料加工以前均应经抛丸预处理流水线除锈并涂上车间底漆。

在车间底漆被应用的初期，通常是车间底漆和船舶的其他涂料都由同一家涂料厂商提供，因为各涂料厂商都将自己生产的车间底漆与其他船舶涂料做过配套性试验，能确保其相互间的适应。

随着造船工业日益发展，造船量越来越大，由于种种原因，一家造船厂所造的船不可能都由一家涂料厂商提供所有的船舶涂料，往往是一家造船厂差不多同时建造的船舶之中要用到二三家甚至四五家船舶涂料厂商提供的船舶涂料。这样，如果每艘船的车间底漆都要采用与其他船舶涂料同一家厂商的产品，则在施工应用和材料管理上会带来很多麻烦。

但是，如同本章一中所介绍，不管哪一家厂商提供的车间底漆，其漆膜均应具有较强的耐溶剂性能，能适应涂覆各种类型的防锈漆，否则就不能成为车间底漆。

各涂料厂商提供的车间底漆也好，其他船舶涂料也好，虽然在配方上各有所差异，所取用的原料产地也各不相同，但在同一种类的涂料上其总体性

能都一样，不存在本质上的差别，因此，一种车间底漆如能与同一厂商生产的其他涂料配套，理应能与其他厂商的涂料配套。所以，为了施工和管理上的方便，一家造船厂在钢材预处理中，只使用一种车间底漆，在理论上是完全可行的。事实上，国外先进的造船厂均实现了使用统一的、并且是本国生产的车间底漆。笔者在 1993 年考察日本和韩国的五六家船厂时，并无发现例外。

在国内，车间底漆统一化的问题在最近几年才意识到，现在不少船厂已经实现或正在开始实现。

实现车间底漆的统一化，必须首先实现车间底漆的国产化，如果统一的车间底漆都需要进口，这对任何船厂来说都是不现实的。当然，不管哪一种国产的车间底漆都必须获得船检当局的认可。

在我国，上海开林造漆厂生产的几种车间底漆在 80 年代初期首先获得中国船检局的认可。中国与英国合资的上海国际油漆有限公司、中国与丹麦合资的海虹—老人牌涂料有限公司、中国与香港合资的中涂化工上海有限公司等合资企业生产的车间底漆均在合资生产以前获得有关国家船级社的认可。另外还有一些地方、乡镇企业的享闻底漆也获得了中国船检局的认可。

表 1－7－5 为部分厂商的车间底漆简介。表 1－7－6 为部分厂商的车间底漆主要技术数据。

表 1－7－5　部分厂商车间底漆简介

生产厂商	涂料种类		性能简介	认可机构
	牌号	名称		
上海开林造漆厂	702	环氧富锌底漆	作造船厂钢板抛丸或喷砂后的保养底漆，保养期约为 9 个月。可作船舶各部位、桥梁以及其他钢铁结构防锈漆之用	中国船舶检验局
上海开林造漆厂	703	环氧铁红车间底漆	作钢板自动抛丸流水线除锈后钢板的车间底漆	中国船舶检验局

生产厂商	涂料种类		性能简介	认可机构
	牌号	名称		
上海开林造漆厂	704	无机硅酸锌底漆	用作为造船厂钢板或钢材在抛丸或喷砂处理后的保养底漆。亦可用于海上钻井平台、码头钢桩、大型钢铁结构作高性能防锈漆之用	中国船舶检验局
上海国际油漆公司	NEA407/409 NEA408/409	1NTERPLATEEPOXY 环氧树脂车间底漆	在制造和装配过程中，用于保护钢板的车间底漆，可保护钢板防止风蚀 6～9 个月，能与大多数后涂漆共用	英国劳氏船级社 挪威船级协会 北英格兰工业卫生协会
上海国际油漆公司	NQA021/026	1NTERPLATEZINC SILICATE 硅酸锌车间底漆	一种在制造过程中及装配过程中，用于保护钢板的车间底漆 能经受长期风蚀，切割性能良好，焊接性能极好，毒害性低	英国劳氏船级社 挪威船级协会 北英格兰工业卫生协会
上海国际油漆公司	NQA933/936 NQA934/936	INTERPLATENIPPECERAMO 耐高温硅酸锌车间底漆	一种在制造及装配过程中，用于保护钢板的车间底漆。电焊，气割及火工校正中，抗损坏性极佳，毒害性低，露天风蚀白锈少，可耐 800C 高温	英国劳氏船级社挪威船级协会北英格兰工业卫生协会
海虹－老人牌涂料公司	1527	环氧车间底漆	可作为自动喷涂施工中经喷砂除锈后的钢板在贮存、装配或建造期间的保护涂层。包括适合用在带外加电流阴极保护装置或无外加电流阴极保护装置的水下部位	英国劳氏船级社 挪威船级协会 北英格兰工业卫生协会 中国船舶检验局

生产厂商	涂料种类		性能简介	认可机构
	牌号	名称		
海虹－老人牌涂料公司	1528	环氧车间底漆	可作为贮存和加工期间经喷砂除锈的钢板和其他钢结构的保护涂层，可涂于带外加电流阴极保护装置的船体水下部位	英国劳氏船级社 挪威船级协会 丹麦焊接协会 中国船舶检验局
海虹－老人牌涂料公司	1589	硅酸锌车间底漆	涂在喷砂清洁后的钢板及其他钢结构表面作贮存和加工期间的短期至中期保护	英国劳氏船级社
日本中国涂料公司	1034	EPICON ZINC RICHP RIMER B－2 环氧富锌底漆	对已经喷砂或喷丸处理而用于水下船体外壳的钢板，可供作防护底漆之用	英国劳氏船级社 挪威船级协会
日本中国涂料公司	1046	WELBONDH 无机硅酸锌醇溶性自干涂料	作为预涂底漆，用于喷涂已经喷砂（喷丸）处理的钢板，可发挥临时性的保护作用，也可用作无机面漆的通用防锈底漆，甚至用作防热漆	英国劳氏船级社 挪威船级协会
泰仓兰燕涂料厂	W53－02	无机硅酸锌车间底漆	具有电化学阴极保护作用，防锈性能优异，耐热可达 400℃，毒性低、耐水、耐油、，耐溶剂、耐曝晒性优良	中国船舶检验局
漂阳市冶建防腐材料厂	TH－2	硅酸锌防锈涂料	具耐高温（400℃）、耐油、耐热、耐海水、耐磨等性能，可作钢材预处理车间底漆，也可作通用防锈底漆	中国船舶检验局
常州市特种涂料厂	E704	无机富锌车间底漆	具有极佳的户外曝晒性能，耐温、耐热、耐油，可作车间底漆，也可作耐油、耐溶剂、耐热涂料	中国船舶检验局

表 1－7－6　部分厂商车间底漆主要技术数据

序号	涂料种类		颜色（色卡号）	漆膜厚度 μm		混合比例①	密度 S/cm³	干燥时间（23℃）		涂装间隔（23℃）		稀释剂	稀释率 %
	牌号	名称		湿膜	干膜			指干 min	硬干 h	最短 h	最长 d		
1	702	环氧富锌底漆	无光，灰	34	20	91:9		30	24	24	—	106	
2	703	环氧铁红车间底漆	铁红	100	25	16:6.4	1.15	2～4		16	—	106	
3	704	无机硅酸锌底漆	灰色	60	20	1:2	1.67	5	1	8	—	107	
4	NEA407/409 NEA408/409	INTERPLATE EPOXY 环氧树脂车间底漆	粉红红色	104	25	3:1	1.12	3～5		6	—	GTA803	≤5
5	NQA02I/026	1NTERPLATE ZINC SILICATE 硅酸锌车间底漆	灰	54	15	1:1	1．6	2～5		24	—	GTA136	≤5
6	NQA933/936 NQA934/936	1NTERPLATE NIPPE CERAMO 耐高温硅酸锌车间底漆	灰色棕色	57	13	0.5:1		5		7d	—	GTA820 或 GTA840	≤15
7	1527	环氧车间底漆	红色 5089	68	15	3:1	1．1	6		6	—	0828	15
8	1528	环氧车间底漆	红色 5089	71	15	2:1	1.1	6		6		0828	15
9	1589	硅酸锌车间底漆	红灰色 1989	60	15	2:3	体积固体含量 25%	4～6		7d	—	0857、0875	15

序号	涂料种类		颜色（色卡号）	漆膜厚度 μm		混合比例①	密度 S/cm³	干燥时间（23℃）		涂装间隔（23℃）		稀释剂	稀释率 %
	牌号	名称		湿膜	干膜			指干 min	硬干 h	最短 h	最长 d		
10	1034	EPICON ZINC RICH PRIMER B－2	绿、棕	47	18	67:33	1.97	4	2	16	180	EPICON ZNIC RICH PRIMER THINNER	10～20
11	1046	WELBOND H 无机硅酸锌醇溶性自干涂料	灰、深绿苔绿、深棕	54	15	65:35	1.43	2	1	7d	180	WELBONDH THINNER	
12	W53－02	无机硅酸锌车间底漆	灰	60	20	2:1	1.6	＜5	1			X406	
13	TH－2	硅酸锌防锈涂料	锌灰色	60	20	2∶1	1.74	＜5	2	2	—	TH 系列专用稀释剂	＜3
14	E704	无机富锌车间底漆	灰白	60	15	3:1	1.85	2	4			102	3

①混合比例一项数据中，序号 1、2、3、12、13、14 产品为质量比，其余产品为体积比。

第四节　防锈涂料

防锈涂料通常称为防锈漆，顾名思义其主要作用是防止钢铁的锈蚀。

钢铁的腐蚀按其腐蚀环境条件区分，可分为大气腐蚀、水中腐蚀、土壤腐蚀、电解质与其他化学介质腐蚀和高温腐蚀五大类。

人们习惯地把能够防止钢铁在自然条件下（即在大气、水和土壤之中）腐蚀的底漆称为防锈漆，而把能够防止钢铁在化学介质或在高温条件下腐蚀的底漆称为防腐漆。

根据上述习惯，能使直接接触海水（电解质溶液）的船体部位免受腐蚀的涂料（底漆）应该称之为防腐漆。但目前在我国，在船舶涂料范畴里，多

数人还是习惯于把用于防止船舶在大气中和海水中腐蚀的涂料（底漆）都列为防锈漆的范围之内。

防锈漆的防锈作用，除依靠基料本身能将腐蚀介质与钢铁表面进行隔离外，在很大程度上还得依靠防锈颜料的防锈作用得以实现。

一、防锈颜料

防锈颜料按其在漆膜中的作用区分，可分为化学防锈颜料和物理防锈颜料两大类。

（一）化学防锈颜料

化学防锈颜料在涂层中能依靠自身的化学性质阻止或降低腐蚀介质对钢铁的腐蚀作用，起到防锈效果的一类颜料。

1. 铅系颜料

（1）红丹，也叫铅丹，含有97%以上的Pb_3O_4，余为PbO，是一种历史很悠久的化学防锈颜料。红丹的结构可视为Pb_2PbO_4。

红丹能与钢铁腐蚀初始阶段的Fe^{2+}产生离子交换，生成难溶的Fe_2PbO_4，也能与Fe^{3+}产生离子交换生成$Fe_4(PbO_4)_3$。红丹还能将Fe^{2+}氧化成稳定的Fe^{3+}，使漆膜增密，减少了离子渗透性。

在水和氧存在下，红丹能与油基漆中油料生成铅皂，具有缓蚀作用。

红丹还能吸收腐蚀介质中SO_4^{2-}成为不溶性$PbSO_4$，这在工业大气中使用具有重要性。

（2）铅酸钙（Ca_2PbO_4）。含铅量比红丹低，其作用类似于红丹。

（3）氰氨化铅。也称碳氮化铅（$PbCN_2$），氰铵化铅水解而成氢氧化铅和氨化合物，碱性较强，能抑制腐蚀，同时能与油料生成铅皂，降低离子渗透性。

2. 锌系颜料

（1）金属锌粉。在涂料中，锌粉粒子间紧密接触能起到类似镀锌层一样的阴极保护作用。而锌粉的氧化产物又能起到封闭作用，阻止腐蚀介质的透

入。

（2）氧化锌。常配合其他颜料用于防锈漆，由于它对酸性物质具有高度皮应性，因而减缓了腐蚀条件，所形成的皂类亦具有封闭作用。

3. 铬酸盐颜料

铬酸盐颜料适用于钢铁用防锈漆，也适合于轻金属防锈。其主要防锈作用是依靠其对水有一定的溶解度，离解出 CrO_4^{2-} 对钢铁进行阳极钝化，大大降低钢铁的腐蚀速度。

铬酸盐中阳离子，如锌铬黄中的锌离子也能起到阴极缓蚀作用。

常用的铬酸盐防锈颜料有锌铬黄［$K_2CrO_4 \cdot 3ZnO_4 \cdot Zn(OH)_2 \cdot 2H_2O$］、四碱式锌黄［$ZnCrO_4 \cdot 4Zn(OH)_2$］、铬酸锶（$SrCrO_4$）、铬酸钙（$CaCrO_4$）、铬酸锶钙，也叫锶钙黄［$SrCrO_4 \cdot CaCrO_4$ 或 $Sr \cdot Ca(CrO_4)_2$］、铬酸钡等。

4. 磷酸盐颜料

磷酸盐作为防锈颜料的品种也很多，如磷酸铁铵、磷酸铁、磷酸铬、磷酸钙和钡等。在应用上比较成功的是磷酸锌［$Zn_3(PO_4)_2 \cdot 4H_2O$（或 $2H_2O$）］。

磷酸锌本身是水合物，具有形成碱式络合物的能力。这种络合物与漆基的极性基团（羟基或羧基）进一步络合，生成稳定的交联络合物以增强漆膜耐水性和附着力，同时也能和 Fe^{2+} 形成络合物，阻止锈的形成和发展。

5. 其他

化学防锈颜料种类有很多，其防锈机理亦各不相同，各有特点，可应用于不同的涂料之中。如有机铬酸盐颜料，较低的用量可获得较高的防锈效果。偏硼酸钡有防霉、杀菌性，可用于乳胶漆中等等。

（二）物理防锈颜料

物理防锈颜料是一种本身化学性质较为稳定的颜料。借助其细微的颗粒充填漆膜结构，能提高漆膜的致密度，降低漆膜的可渗性，从而达到一定的防锈效果。一般常用的物理防锈颜料有红土、铁红、铁黄、铝粉和云母氧化铁等。其中铝粉和云母氧化铁其构型呈片状，在漆膜中薄片相叠，具有很好的防水、气渗透的作用和较好的耐候性。

物理防锈颜料可以一种或几种一起用于防锈漆中，也常和化学防锈颜料一起用于防锈漆。

二、船底防锈漆

船舶漆中的防锈漆由船底防锈漆和船用防锈漆两大部分组成。

船底防锈漆是漆膜长期浸泡在水下的用以保护船底钢板的一种专用防锈涂料，应具有以下性能：

（1）漆膜在钢铁表面必须具有很好的湿态附着力，在长期浸水和水流冲击下漆膜不会起泡脱落；

（2）漆膜耐水性好，透水性及氧气透过率小；

（3）干燥性能好；

（4）与船底防污漆有良好的配套性，与防污漆漆膜间的层间附着力好，不干扰防污漆的防污性能；

漆膜具有良好的耐碱性和耐电位性，能与阴极保护装置配合使用。

关于船底防锈漆的技术指标，GB 13351－92 作出了如下规定。

单独船底防锈底漆应符合下列技术指标：

项目	指 标
干燥时间	
表干，h	按产品技术要求
实干，h≤	24
附着力，级≤	2
耐盐水性	
浸盐水 24d	漆膜无脱落，允许锈蚀面积不超过 5%

完整的船底防锈漆配套系统应符合下列技术指标；

项目	指标
干燥时间	
表干，h	按产品技术要求

项目	指标	
实干，h ≤	24	
附着力，h ≥	沥青类 1.96×10^5	其他类 2.94×10^6
耐盐水性		
浸盐水 30 个月（一级）		
浸盐水 18 个月（二级）	漆膜无脱落，允许锈蚀面积不超过 5%	
漫盐水 12 个月（三级）		

注：漆膜厚度应符合产品技术要求。

常见的船底防锈漆的品种如下所述。

（一）沥青系船底防锈漆

沥青系船底防锈漆历史最为悠久，其防水性好，价格低廉，尽管其耐热性差、不耐干湿交替和大气曝晒，但在合成树脂涂料大量应用的今天，沥青系船底防锈漆仍在中、小型船舶的建造和维修中被广泛应用。

目前我国常用的沥青系船底防锈漆有 L44－1 铝粉沥青船底漆和 L44－2 沥青船底漆两种。

1. L44－1 铝粉沥青船底漆

L44－1 铝粉沥青船底漆含有较多的叶展型铝粉，不仅增强了防水、防锈性能，又因铝粉反光性好、紫外线难以通过，增强了耐大气曝露的性能。但该漆的耐电位性能较差，只适合阴极保护电位不负于－0.85V（AsCl/海水电极）的情况下应用。L44－1 铝粉沥青船底漆配方（例）参见表 1－7－7。

表 1－7－7　沥青系船底防锈漆配方（例）

原材料名称	L44－1 配方，%	L44－2 配方，%
冶炼氧化锌	13.2	5.9
云母粉	3.8	
山东红土		35.2

原材料名称	L44－1 配方，%	L44－2 配方，%
滑石粉		2.9
重晶石粉		2.8
65%铝粉浆	18.0	
煤焦沥青	38.4	
023 煤焦沥青液（66.7%）		46.1
重质苯	26.6	7.1

2. L44－2 沥青船底漆

L44－2 沥青船底漆漆膜坚韧、耐水性和防锈性能良好，但不耐大气曝露、不能在日光下曝晒，否则漆膜会发生龟裂，故不能用于水线以上部位。其通常与 L44－1 铝粉沥青船底漆配套使用，作为 L44－1 与防污漆之间的中间涂层。在旧船维修涂装中，可作为船底残留的旧防污漆的封闭层。

L44－2 沥青船底漆耐电位性能亦较差，只适合于阴极保护电位不负于－0.85V（AgCl/海水电极）的情况—下应用。L44－2 沥青船底漆的配方（例）见表 1－7－8。

（二）氯化橡胶船底防锈漆

氯化橡胶船底防锈漆，较之传统的沥青系船底防锈漆来说属较高性能的船底防锈漆。

由于氯化橡胶涂料有很好的抗水和氧的渗透的性能、耐酸与碱的性能强、施工方便，曾一度获得广泛的应用。

氯化橡胶船底防锈漆有氯化橡胶铝粉防锈漆、氯化橡胶铁红防锈漆、氯化橡胶灰色防锈漆和氯化橡胶沥青防锈漆等多种，其配方（例）见表 1－7－8。

表 1－7－8　氯化橡胶船底防锈漆配方（例）

配方，%	原材料名称			
	铝粉防锈漆	铁红防锈漆	灰色防锈漆	沥青防锈漆
氯化橡胶 R10	12.0	14.5	19.6	9.8

配方，%	原材料名称			
	铝粉防锈漆	铁红防锈漆	灰色防锈漆	沥青防锈漆
氯化石蜡 70	7.0	9.7	13.0	
氯化石蜡 52				3.5
氯化石蜡 42	4.0	4.9	6.7	
煤焦沥青（85%）				16.4
古马隆树脂				0.7
钛白粉（R 型）	6.0		13.3	
氧化铁红	1.0	19.1		
铝粉浆（65%）	12.0			
氧化镁	0.3			
云母氧化铁				28.7
重晶石粉	18.0	19.1	13.4	
炭黑			0.2	
				1.5
环烷酸锌				
滑石粉				9.7
改性氢化蓖麻油	1.6	1.9	1.8	1.5
二甲苯	38.1	30.8	32.0	28.2

氯化橡胶涂料在高温、日光或三氯化铁、三氯化铝等因素影响下，会逐步释放出 HCl 气体，并在分子中形成双键而发生交联，进而形成网状结构而导致氯化橡胶涂料的胶化，特别是含有铝粉的防锈漆，如没有合适的稳定剂则其贮存稳定性很差。稳定剂则可采用环烷酸锌、低分子环氧树脂、环氧化豆油、轻质氧化镁等。

在氯化橡胶沥青防锈漆中，沥青的存在会影响稳定剂的作用，因此氯化橡胶沥青防锈漆往往采用两罐装。

（三）环氧沥青船底防锈漆

环氧沥青船底防锈漆属高性能船底防锈涂料。是由环氧树脂、煤焦沥

青、防锈颜料、溶剂等和作为固化剂的聚酰胺树脂组成的两罐装涂料，通常为黑色或棕色。

环氧树脂有优异的耐碱性和抗化学介质的能力，附着力强、机械强度高，但耐水性稍差。沥青具有优异的耐水性和湿润性，防锈性能好，但耐热与耐候性差，涂膜的机械强度亦较差。聚酰胺树脂在常温下是粘稠的液体，分子结构中有较长的碳链和较多的极性基团，因此具有很好的弹性和附着力。它与环氧树脂有良好的混容性，对颜料有很好的湿润性。

由一定比例的环氧树脂、煤焦沥青和聚酰胺树脂组成的环氧沥青防锈漆，克服了环氧树脂与沥青各自的缺点，发挥了三者的优点，使它既具有环氧树脂涂料的优良附着力、耐冲击、耐磨、耐酸碱、耐各种化学介质的卓越性能，又具有沥青涂料耐水性好，成本低廉的优点，还兼备聚酰胺树脂柔韧性好富有弹性的长处。因此，环氧沥青船底防锈漆受到船东的青睐，应用越来越广泛。

环氧沥青涂料用作船底防锈漆，保护效果特好，其耐电位性能优异，能适应 -1.1V（AgCl/海水电极）的阴极保护。与自抛光防污漆配套使用，防污有效期可达到 5 年。

但环氧沥青涂料也保留了环氧树脂和沥青的一部分缺点，涂层的固化速度同样受温度的影响较大，低于 5℃时固化反应几乎停止；涂层与涂层之间的涂装间隔时间仍有限制，超过规定时间后，层间附着力会受到影响，故在防锈漆和防污漆之间需加涂一道中间过渡层，以确保防污漆的附着力；沥青的强渗色性会对面层浅色涂料带来渗色影响，故船舶的水线、干舷区不宜采用环氧沥青防锈底漆加一般的浅色面漆的配套。环氧沥青船底防锈漆的配方（例）见表 1-7-9。

表 1-7-9　环氧沥青船底防锈漆配方（例）

原材料名称	环氧沥青防锈漆配方，%	厚膜型环氧沥青防锈漆配方，%
E-20 环氧树脂	15	20
70%煤焦沥青液	28	
煤焦沥青		24

原材料名称	环氧沥青防锈漆配方,%	厚膜型环氧沥青防锈漆配方,%
铝粉	15	11
防锈颜料与填充料	6	9
触变剂		2
丁醇	12	2
重质苯	16	
甲苯		11
二甲苯		6
甲基异丁基酮		3
乙二醇乙醚		1
聚酰胺	8	11

注：环氧沥青系涂料属双组分（两罐装）涂料，环氧树脂与固化剂聚酰胺应分别包装，通常环氧树脂与颜料及适量溶剂构成一个组分，聚酰胺与煤焦沥青及适量溶剂为另一组分，使用时两者按规定比例混合。

（四）乙烯型船底防锈漆

乙烯型船底防锈漆多以氯乙烯、醋酸乙烯、顺丁烯二酸酐三元共聚体树脂为主要成膜物质，并添加适当的增塑剂、稳定剂、颜料、触变剂和溶剂构成。

氯醋三元共聚体船底防锈漆有优良的耐水性、耐碱性、耐油性和耐电位性，耐阴极保护电位可达 $-1.1V$（AgCl/海水电极）。可在 $-10℃$ 的低温下施工。

由于氯醋共聚体树脂溶解度有限，故制成涂料的固体分含量较低，在船底防锈漆中常增加部分沥青以提高其固体分含量，同时也能进一步增强其对钢材表面的附着力。通常将沥青改性的氯醋共聚体树脂为基料的船底防锈漆称之为乙烯沥青船底防锈漆。当其厚度在 $200 \sim 250\mu m$ 范围内时的防锈有效期可达 3 年左右。

乙烯沥青船底防锈漆可与各种类型的防污涂料配套，与 SPC 防污涂料

配套，防污有效期可达 3～5 年。

在新船建造时，乙烯沥青船底防锈漆常与环氧沥青船底防锈漆配套使用，以环氧沥青防锈漆作底层涂料，乙烯沥青防锈漆作为中间层，面层采用 SPC 防污涂料。这是因为乙烯沥青涂料不像环氧沥青类涂料具有涂装间隔时间的限制，这将给船舶涂装工艺带来许多方便。

三、船用防锈漆

船用防锈漆通常指船舶水线以上大气曝露区域和机舱、房舱、货舱等室内区域用的一般防锈涂料，不包括船底防锈涂料和液舱用的特殊防锈涂料(液舱涂料)。

根据不同的用途，这一类防锈漆通常以油料、醇酸树脂、酚醛树脂、氯化橡胶、环氧树脂、环氧酯等为基料，以红丹、锌铬黄、磷酸锌、氧化铁红、钛白粉等为颜料，有的还以滑石粉、重晶石粉等为体质颜料组成。这类防锈漆应具有以下性能；

①与钢铁表面的附着力好，并能与各类相应的面层涂料配套；

②漆膜应具有良好的耐水性和耐候性；

③漆膜机械强度良好，有一定的抗冲击和抗摩擦能力，并具有较好的柔韧性。

关于船用防锈漆的技术指标，GB 6748—86 作出了如下规定。

产品应符合下列技术指标：

项目	指标
附着力，级	符合产品技术指标
固体含量，% ≥	
氧化型	55
其他类型	符合产品技术指标
柔韧性，mm ≤	2

项目	指标
耐盐水性（浸 96h）	漆膜无剥落、无起泡、无锈斑 允许颜色轻微变浅、失光
对面漆的适应性	无不良现象

与船底防锈漆不同，船用防锈漆一般以所采用的主体防锈颜料或是颜料与基料相结合来区分的。本书以主体防锈颜料为线索，介绍有关品种。

（一）红丹防锈漆

红丹防锈漆简称红丹漆，以红丹（Pb_3O_4）为主体防锈颜料，常以油基树脂或醇酸树脂为基料，是防锈漆中使用最悠久的品种。红丹漆也有以酚醛树脂、氯化橡胶、环氧树脂、环氧酯等为基料的，品种有多种多样。

红丹漆漆膜坚韧、附着力好、对钢材表面处理的要求不高，具有较好的湿润性。其防锈性能优良，船舶的室外曝露区域常采用红丹漆作为底漆。油性红丹漆不适宜用于水线及水线以下区域，因在水下不耐电位，容易起泡剥离。

红丹漆耐候性较差，在大气中曝露时间一长，易与空气中的二氧化碳作用形成碱式碳酸铅而发白粉化，故需及时涂装面漆。

红丹漆不适宜用于轻金属防锈，因为红丹的电极电位较正，与轻金属之间电位差较大，易引起电化学腐蚀。

红丹漆的主要缺点在于铅的毒性，在焊接、切割时产生的含铅的烟尘对健康威胁较大，因此红丹漆一般不用于通风条件有限的室内区域。在室外曝露区应用红丹漆后，在焊接、火工校正时应注意防毒。其次是红丹的比重大，易沉淀板结，贮藏中应采用适当的措施。红丹防锈漆的配方（例）见表 1－7－10。

表 1－7－10　红丹防锈漆配方（例）

原材料名称	配比，%			
	红丹油性防锈漆	红丹酚醛防锈漆	红丹醇酸防锈漆	红丹环氧防锈漆
红丹（98%）	60	60	60	60
硫酸钡	10	3	4	3
滑石粉			4	3
碳酸钙	2.5	6		4
油性漆料	20.85			
油基酚醛漆料		30.85		
醇酸树脂（50%）			27	
环氧酯（50%）				24.16
硬脂酸锌	0.15	0.15		
催干剂	铅（10%）0.5 锰（2%）1.0		钴（2.5%）0.14 锰（2%）0.2 锌（3%）0.32 铅（10%）0.65	钴（2.5%）0，2 锰（2%）0.3 铅（10%）0.5
松香水			3.69	
丁 醇				1
重质苯				3.84

（二）铁红防锈漆

氧化铁红是一种物理防锈颜料，其性质稳定、遮盖力强、颗粒细微、能在漆膜中起到很好的屏蔽作用，常与铝粉或其他化学防锈颜料（如锌黄、磷酸锌、氧化锌等）结合使用。所用的基料有油基、醇酸树脂、酚醛树脂、环氧酯等。

铁红防锈漆由于不含红丹，不会像红丹漆那样产生铅烟雾问题，适合于焊接、切割和火工校正，但其防锈性能低于红丹，因此船舶上常用于室内如

机舱、上层建筑内部、货舱等。

由于铁红防锈漆的耐候性好，工业上有时也用于室外防锈。铁红防锈漆的配方（例）见表 1－7－11。

表 1－7－11　铁红防锈漆配方（例）

原材料名称	配比，%				
	铁红酚醛防锈漆	铝粉铁红防锈漆	铁红纯酚醛防锈漆	铁红醇酸防锈漆	铁红环氧防锈漆
铁红	30		12	20	20
天然铁红		13.2			
锌铬黄			7.61		
磷酸锌		16。5			
氧化锌	5（含铅）	3.S	6.78	5	10（含铅）
滑石粉		8.8	13.36	5	15
硫酸钡	15			8	
碳酸钙	10				
铝粉浆（65%）		3.2			
油基酚醛漆料（70%）	35				
油基纯酚醛漆料		45.2	45		
醇酸漆料（50%）				42	
环氧酯（50%）					34
三聚氰胺树脂（50%）					2
催干剂	钴（4%）0.2	钴（4%）0.5	钴（4%）0.062，	钴（2.5%）0.2	钴（2%）1
	锰（3%）0.15	锰（4%）1	锰（3%）e.22	锰（2%）0.4	锰（2%）1
	铅（10%）0.6	铅（10%）2	铅（10%）1.18	铅（10%）0.8	铅（10%）1
			锌（3%）0.124	锌（3%）0.5	
			钙（3%）0.124		
硬脂酸铝	0.28				
松香水	3.77	6.1	6.77	13.1	
二甲苯			6.77		11.2
双戊烯					4.8

（三）云铁防锈漆

云母氧化铁是一种化学性质稳定的片状物理防锈颜料。在防锈底漆中，云母氧化铁由于片状重叠覆盖，具有很好的防水与气渗透的作用和良好的耐候性。漆膜经日光照射后，有一定的蓄热能力，在海洋性气候地区可以防结露，从而降低腐蚀作用。所用的基料有油基、酚醛、环氧酯、环氧树脂等。在船舶、桥梁等处于海洋性大气和湿热地区的钢铁表面使用，具有良好的防锈效果。云铁防锈漆的配方（例）见表 1－7－12。

表 1－7－12　去铁防锈漆配方（例）

原材料名称	配比，%			
	云母氧化铁酚醛防锈漆	云母氧化铁环氧防锈漆		云母氧化铁环氧酯防锈漆
云母氧化铁	39.4	组分A	35	40
氧化铁红	3.3			
磷酸锌	6.5		3	
滑石粉	7.4			4
铝粉浆（65%）	3.4		3	
铝粉浆（非浮型）				3
109 锌黄			5	3
硬脂酸铝			0.3	
膨润土				0.8
油基酚醛漆料	39.4			
60%环氧树脂液			32	
60%煤焦沥青			16	
619 环氧酯料				40
催干剂	钴（4%）0.2 锰（3%）0.4			锰（2%）1 铅（6%）1.6
二甲苯			6	3.6
丁醇			2.7	
己二胺		组分A	50	
乙醇			50	
		70%组分A：50%组分B＝100：2.2		

（四）铬酸盐防锈漆

铬酸盐防锈颜料中目前用得最广的是锌铬黄，主要用作铝镁等有色金属的防锈漆。锌铬黄对大气曝露的效果良好，但对工业酸性大气抵抗力较差，因此常与氧化锌同时使用。锌铬黄微溶于水，遇水产生铬酸根离子（CrO_4^{2-}），可使金属表面钝化而增加防锈性能。锌铬黄常与低溶解度的铬酸盐颜料或铁黄等配合使用。一般，锌铬黄在防锈漆中的用量为颜料总量的40%左右。

锌铬黄防锈漆常用的漆料为油基树脂、醇酸树脂、环氧酯和环氧等。锌铬黄防锈漆的配方（例）见表1－7－13。

表1－7－13　锌铬黄防锈漆配方（例）

原材料名称	配比，%			
	锌黄油基防锈漆	锌黄纯酚醛防锈漆	锌黄醇酸防锈漆	锌黄环氧防锈漆
锌铬黄	21	10.16	22.8	20
中铬黄			4.98	
氧化锌	8	7.63	15.2（含铅）	10（含铅）
钛白粉	6			
硫酸钡	14			
滑石粉		7.63		15
酚醛漆料（55%）	35			
纯酚醛漆料（50%）		49.42		
熟油			0.22	
酚醛树脂液（50%）			14.0	
醇酸漆料（50%）			26.98	
环氧酯（50%）				34
三聚氰胺树脂（50%）				2
催干剂	钴（2.5%）0.4	钴（4%）0.18	钴（4%）0.49	钴（2%）1

原材料名称	配比，%			
	锌黄油基防锈漆	锌黄纯酚醛防锈漆	锌黄醇酸防锈漆	锌黄环氧防锈漆
	锰（2%）0.？ 铅（10%）0.8	锰（3%）0.44 铅（10%）3.05 锌（3%）0.22 钙（3%）0.47	锰（2.5%）0.76 铅（10%）0.76	锰（2%）1 铅（10%）.1
200 号油漆溶剂油	11	10.4		
二甲苯	3.1	10.4	13.15	11.2
双戊烯			0.66	4.8

四、其他防锈漆

前两节介绍的船底防锈漆主要以基料加以区分、船用防锈漆主要是以主体颜料加以区分的，所介绍的一些品种是船舶漆中常见的品种。在船舶漆范畴里还有多种防锈漆，比较重要的有环氧富锌底漆、无机锌防锈漆、用于液舱保护用的各种液舱涂料等，对此，我们将在有关章节中另行介绍。

第五节　防污涂料

防污涂料通常称为船底防污漆或简称防污漆，是防止海洋附着生物污损、保持船底光洁的一种专用涂料。

在世界各海域中有八千多种植物和五万九千种海洋动物，其中有六百多种附着植物和一万八千多种附着动物。这些附着生物的幼虫或孢子能够漂浮或游动，发育到了一定阶段后，就在船底、水下结构物或岸边岩石等物体上附着、定居并进一步繁殖。

海洋生物大量附着在船底上，对船舶将带来很大的危害，它们不仅将增